



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

**VYHODNOCENÍ ÚČINNOSTI POLOPROVOZNÍ
ULTRAFILTRAČNÍ JEDNOTKY**

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF A PILOT ULTRAFILTRATION UNIT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristína Zelinová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. TOMÁŠ KUČERA, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství obcí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Kristína Zelinová
Název	Vyhodnocení účinnosti poloprovozní ultrafiltrační jednotky
Vedoucí práce	doc. Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] LETTERMAN, Raymond D., ed. Water quality and treatment: a handbook of community water supplies. 5th ed. New York: McGraw-Hill, c1999. ISBN 0070016593.
- [2] Water treatment handbook. 7th [English] ed. Rueil-Malmaison, France: Degremont, 2007. ISBN 978-2-7430-0970-0.
- [3] Operational control of coagulation and filtration processes. 2nd ed. Denver, Colo.: American Water Works Association, c2000. ISBN 15-832-1055-5.
- [4] PIVOKONSKÝ, Martin. Tvorba suspenze při úpravě vody: teorie a praxe. Líbeznice: Medim, 2011, 218 s. ISBN 9788087140185.
- [5] Microfiltration and ultrafiltration membranes for drinking water. Denver, CO: American Water Works Association, c2005, xxii, 257 s. ISBN 15-832-1360-0.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Předmětem bakalářské práce je vyhodnocení provozu instalované poloprovozní ultrafiltrační jednotky na konkrétní úpravně vody. Cílem práce je posoudit vhodnost nasazení ultrafiltrace na této konkrétní úpravně vody a případné doporučení instalace během plánované rekonstrukce.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Prvá časť tejto bakalárskej práce sa zaoberá zhrnutím doterajších poznatkov o membránových technológiách a ich využití pri úprave pitnej vody. Sú v nej uvedené používané druhy membrán a klasifikácia jednotlivých membránových procesov. Ďalej sú priblížené prevádzkové procesy, ktoré súvisia s využitím membrán na úpravniach vody a uvedené sú aj niektoré úpravne vody v Českej republike, kde tieto zariadenia boli alebo v súčasnosti sú používané. V druhej časti práce je priblížená situácia v obci Poniky, v Slovenskej republike, ktorá trpí sezónne zvýšeným zákalom na jednom z jej zdrojov pitnej vody. Vlastník tohto vodovodného systému má zámer tento problém kvality vody riešiť práve použitím membránového zariadenia. V rámci tejto práce sú uvedené a vyhodnotené výsledky z prvého testovania membrány na postihnutom vodnom zdroji.

KLÍČOVÁ SLOVA

membrána, membránové procesy, mikrofiltrácia, ultrafiltrácia, nanofiltrácia, reverzná osmóza, zákal, úprava pitnej vody

ABSTRACT

The first part of this bachelor thesis deals with a summary of current knowledge about membrane technologies and their application in drinking water treatment. There are listed different types of membranes and classification of membrane processes. Further on, there are defined operation processes that are related to their use in water treatment plants and there are also listed some of the water treatment plants in the Czech republic, where these technologies were or are still being used. In the second part of this thesis, there is described a situation in a village Poniky, in Slovak republic, which suffers from seasonally increased turbidity on one of their drinking water sources. The owner of the water supply system has an intention of treating this water quality problem by using a membrane technology. This thesis presents and evaluates results from the first membrane tests executed on the affected water source.

KEY WORDS

membrane, membrane processes, microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis, turbidity, drinking water treatment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Kristína Zelinová *Vyhodnocení účinnosti poloprovozní ultrafiltrační jednotky*. Brno, 2021. 58 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce doc. Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Vyhodnocení účinnosti poloprovozní ultrafiltrační jednotky* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 28. 5. 2021

Kristína Zelinová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vyhodnocení účinnosti poloprovodní ultrafiltrační jednotky* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28. 5. 2021

Kristína Zelinová
autor práce

POĎAKOVANIE

Rada by som sa poďakovala svojmu vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Tomášovi Kučerovi, Ph.D. za poskytnutie cenných rád a pomoci pri spracovaní tohto zadania. Ďalej by som sa chcela poďakovať Ing. Ondrejovi Kapustovi, Ph.D. a Ing. Michalovi Dóšovi, Ph.D. zo Stredoslovenskej vodárenskej spoločnosti, a.s., za ich ochotu zodpovedať moje dotazy, za umožnenie prístupu do vodárenských objektov a možnosť využitia ultrafiltračného modulu.

OBSAH

1	ÚVOD.....	4
2	MEMBRÁNOVÉ PROCESY.....	5
2.1	Membrány.....	5
2.1.1	Klasifikácia membrán	5
2.2	Klasifikácia membránových procesov.....	9
2.2.1	Klasifikácia podľa hydraulickéj konfigurácie.....	9
2.2.2	Klasifikácia podľa hnacej sily.....	10
2.3	Tlakové membránové procesy.....	11
2.3.1	Mikrofiltrácia (MF).....	12
2.3.2	Ultrafiltrácia (UF)	12
2.3.3	Nanofiltrácia (NF).....	13
2.3.4	Reverzná osmóza (RO)	13
2.3.5	Separácia plynov (GS – gas separation)	14
2.3.6	Pervaporácia (PV)	14
2.4	Produkcia membránou upravenej vody.....	15
2.5	Prevádzkové procesy.....	16
2.5.1	Predúprava vody	16
2.5.2	Mechanická regenerácia.....	16
2.5.3	Regenerácia chemickými činidlami	17
2.5.4	Testovanie celistvosti membrány.....	19
2.5.5	Doúprava vody.....	20
3	IMPLEMENTÁCIA MEMBRÁNOVÉHO ZARIADENIA DO SYSTÉMU ÚPRAVY PITNEJ VODY	21
3.1	Výber vhodného zariadenia.....	21
3.2	Poloprevádzka	22
3.2.1	Plánovanie.....	22
3.2.2	Trvanie poloprevádzky	23
3.2.3	Optimalizácia parametrov	23
3.2.4	Monitorovanie parametrov	23
3.2.5	Vyhodnotenie poloprevádzky	24
4	MEMBRÁNOVÁ FILTRÁCIA NA ÚPRAVNIACH VODY V ČR	25

4.1 ÚV Trnová	25
4.2 Mobilná úpravňa vo Vyššom Brode	26
4.3 ÚV Svobodka	27
5 ZÁSODOVANIE PITNOU VODOU V OBCI PONIKY	29
5.1 Základné údaje o obci a kvalite pitnej vody	29
5.2 Poniky - vodovod	29
5.2.1 Spotrebisko Ponická Lehôtka	30
5.2.2 Spotrebisko Poniky	30
5.3 Objekty problémového úseku	30
5.3.1 Prameň Horedolinie 2	30
5.3.2 Areál ČS Horedolinie.....	30
5.3.3 Vodojem Poniky – VDJ1, Na Dielci.....	32
6 SEZÓNNE ZVÝŠENÝ ZÁKAL PRAMEŇA HOREDOLINIE 2.....	33
6.1 Požiadavky na hodnoty zákalu v pitnej vode.....	33
6.2 Pôvodný stav	33
6.3 Nové riešenie	35
6.3.1 Ultrafiltračný modul UA-640 Microdyn Nadir.....	35
6.4 Predbežné vyhodnotenie voľby zariadenia	38
6.5 Testovanie ultrafiltračnej jednotky na ČS Horedolinie.....	39
6.5.1 Zapojenie ultrafiltračného modulu	39
6.5.2 Zahájenie testovania.....	41
6.6 Spracovanie nameraných hodnôt	44
6.7 Vyhodnotenie nameraných hodnôt.....	48
7 ZÁVER.....	49
8 POUŽITÁ LITERATÚRA	50
ZOZNAM TABULIEK.....	54
ZOZNAM OBRÁZKOV	55
ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV	56
SUMMARY.....	58

1 ÚVOD

Kvalita vody, vyskytující se v přírodě, se pohybuje v široké škále a závisí na mnohých faktorech. Je ovlivňována obsahem organických a anorganických látek, jako aj přítomností mikroorganismů. Pro použití vody jako pitné, je potřebné aby splňala legislativní požadavky, které zabezpečují její zdravotní nezávadnost. K tomuto zámeru slouží rada fyzikálních a chemických procesů.

Jedním z nejčastěji používaných procesů pro úpravu vody je filtrace, která umožňuje z vody odstranit pevné látky. Konvenční filtrace dokáže zachytit znečištění jen od určité velikosti částic, což nie vždy postačuje pro dosiahnutie požadovanej kvality vody. Využitie membrán ako filtračného zariadenia umožňuje eliminovať častice oveľa menšie, v niektorých prípadoch až na iónovej úrovni.

Existuje viacero membránových procesů, ktoré fungujú na rôznych princípoch. Líšia sa druhom použitej membrány a veľkosťou častíc, ktoré sú schopné odstrániť. Na základe toho je odlišná aj oblasť ich aplikácie v praxi. S ich praktickým využitím súvisí aj niekoľko prevádzkových procesů, ktoré zabezpečujú správne fungovanie membrán a predlžujú ich životnosť.

Vo svete je v súčasnosti táto technológia bežne využívaná a patrí medzi konvenčné spôsoby úpravy vody. V Českej a Slovenskej republike sa momentálne vyskytuje ojedinele ale v posledných rokoch pribúdajú prevádzkovatelia vodovodných systémů, ktorí pristupujú k využitiu membrán pre účely úpravy pitnej vody.

V tejto práci budú v prvej časti priblížené jednotlivé membránové procesy, ich použitie pri úprave vody a úkony, ktoré súvisia s ich správnou prevádzkou. Uvedené budú aj úpravne v Českej republike, ktoré membránové zariadenia do svojho systému úpravy vody zaradili.

Druhá časť práce je zameraná na konkrétny problém kvality vody v obci Poniky, ktorá sa nachádza na Strednom Slovensku. V tejto obci majiteľ vodovodného systému plánuje inštaláciu membránového modulu ako riešenie sezónneho zvýšenia zákalu vody na jednom z vodných zdrojů. Pred samotným zakúpením zariadenia, bol membránový modul zapožičaný pre overenie jeho schopnosti odstrániť daný problém. V tejto práci je v posledných kapitolách zaznamenané meranie zákalu na tomto zdroji a miera jeho eliminácie pomocou membrány. Výsledky merania sú následne vyhodnotené.

2 MEMBRÁNOVÉ PROCESY

Procesy oddělovania pevných častíc od tekutiny na základe veľkosti vo všeobecnosti nazývame filtráciou. Filtrácia je základnou operáciou pri úprave pitnej vody. Konvenčne prebieha prostredníctvom filtrov so zrnitým médiom (napr. kremičitý piesok, kamenné uhlie, antracit). Tieto filtre sú schopné produkovať vodu vysokej kvality, neposkytujú však úplnú bariéru. Niektoré patogény a menšie častice môžu cez filtračnú náplň preniknúť. Preto v určitých situáciách klasické filtre nepostačujú k dosiahnutiu požadovanej kvality vody. Pojem „filter“ je väčšinou obmedzený na mechanizmy separujúce častice väčšie ako 1-10 μm . V prípade potreby oddelenia menších častíc sa pristupuje k membránovým procesom. [1] [2]

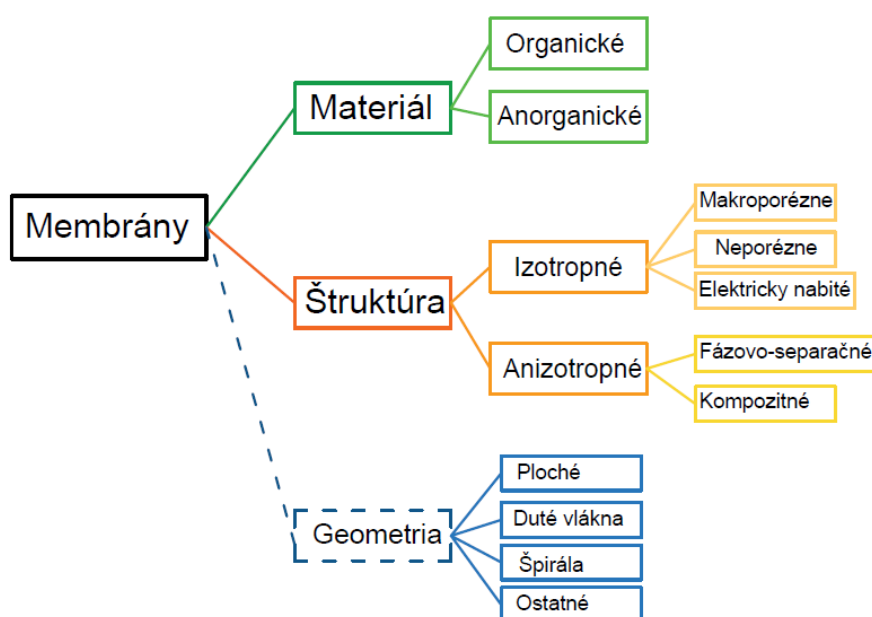
2.1 MEMBRÁNY

Pojem „membrána“ má odlišné významy v rôznych odboroch. V súvislosti so separáciou, koncentraciou a čistiacimi procesmi, je membrána definovaná ako pasívna alebo aktívna bariéra slúžiaca k separácii dvoch fáz, so schopnosťou obmedziť transport rôznych komponentov selektívnym spôsobom. Je to tenká vrstva, ktorá dokáže separovať materiály, na základe ich fyzikálnych a chemických vlastností. [4]

Medzi základné požiadavky pre membrány patria vysoký prietok produktu, mechanická pevnosť pre udržanie fyzikálnej štruktúry a dobrá selektivita pre požadované látky. Membránový separačný systém oddeľuje prítok na dve zložky – permeát (filtrát) a koncentrát (retentát). Permeát je vyfiltrovaná časť tekutiny, ktorá prešla membránou. Koncentrát obsahuje zložky, ktoré boli membránou zachytené. [9]

2.1.1 Klasifikácia membrán

Membrány môžu byť delené podľa mnohých kritérií. Podľa materiálu, štruktúry, geometrie, výroby, separačného procesu, atď. Niektoré vybrané klasifikačné kategórie sú priblížené v nasledujúcom texte a schematicky zobrazené na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Delenie membrán

Klasifikácia podľa materiálu

Podľa materiálu sa membrány delia na organické a anorganické. Ich základné porovnanie je zobrazené v Tab. 2.1. Organické membrány, ktoré sa označujú aj ako polymérne, sa vyrábajú z organických polymérov. Medzi tie najpoužívanejšie patrí celulóza, acetáty celulózy, estery celulózy, dusičnany celulózy, polykarbonáty a mnoho ďalších. Tento druh membrán je v súčasnosti pri úprave vody používaný najčastejšie. [5]

Na výrobu anorganických membrán sa bežne využívajú oxidy, keramika a kovy. Majú väčší rozsah použitia, čo sa týka teploty (až do 500°C) a sú odolnejšie voči chemickým látkam. To rozširuje možnosti ich využitia aj pre čistenie silne priemyselne znečistených vôd a vôd, do ktorých je dávkaný chlór alebo iná dezinfekcia, ktorá by organické membrány rozložila. Ich odolnosť taktiež umožňuje čistenie silnými chemikáliami. Ich cena je však vyššia. [5]

Tab. 2.1. Porovnanie organických a anorganických membrán [5]

	Organické membrány	Anorganické membrány
Materiál	Rôzne polyméry (kryštalické, sklovité, amorfné, gumené...)	Sklo, keramika, oxid kremičitý, kovy...
Charakteristiky	Pevné v sklovitej forme, ohybné v gumenej forme	Chemicky a termálne stabilné, mechanicky odolné
Výhody	Efektivita nákladov, dobrá selektivita, ľahká spracovateľnosť	Odolnosť pri silnom chemickom čistení a vysokých teplotách, odolnosť proti opotrebovaniu, stabilná štruktúra pórov, vysoká chemická stabilita, dlhá životnosť
Nevýhody	Chemicky neodolné, obmedzená prevádzková teplota a tlak, kratšia životnosť	Krehkosť, nepoddajnosť

Klasifikácia podľa štruktúry

Podľa štruktúry sa membrány rozdeľujú do dvoch skupín - izotropné (symetrické) a anizotropné (asymetrické).

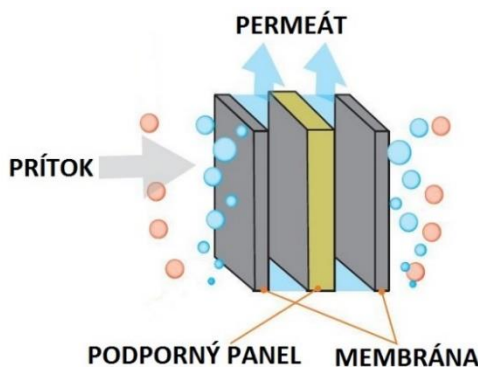
- Izotropné membrány majú homogénnu kompozíciu, teda skladajú sa len z jedného materiálu. Delia sa do podkategórií na makroporézne, neporézne a elektricky nabité.
 - Makroporézne membrány, tiež nazývané aj preosievacie, filtrujú látky na základe veľkosti. V ich stene sa nachádzajú póry, ktorými nepreniknú častice väčších rozmerov. Priemer týchto pórov sa pohybuje v rozmedzí 0,1-5 µm.
 - Pri neporéznych membránach dochádza k prepúšťaniu látok z jednej strany membrány na druhú transportnými kanálíkmi v hutnej štruktúre membrány.
 - Elektricky nabité membrány (aniónovo-výmenné, kationovo-výmenné) nesú trvale kladne alebo záporne nabité ióny. Sú vyrobené z neporézneho kompaktného filmu alebo mikroporézneho materiálu. Transportný mechanizmus je riadený koncentráciou iónov a náboja rozpustených látok.

- Anizotropné membrány sú heterogénne z hľadiska ich chemického zloženia alebo ich štruktúry. Do tejto kategórie patria:
 - Fázovo-separačné (Loeb-Sourirajanove) membrány - majú homogénne chemické zloženie ale ich štruktúra, konkrétne pórovitosť a veľkosť pórov sa mení v rámci membránovej steny.
 - Kompozitné membrány - skladajú sa z dvoch častí. Majú tenkú povrchovú vrstvu umiestnenú na hrubom mikroporéznom substráte z polymérneho materiálu. Povrchová vrstva plní separačnú funkciu, zatiaľ čo mikroporézny substrát poskytuje hlavne mechanickú stabilitu. [5] [1]

Klasifikácia podľa geometrie

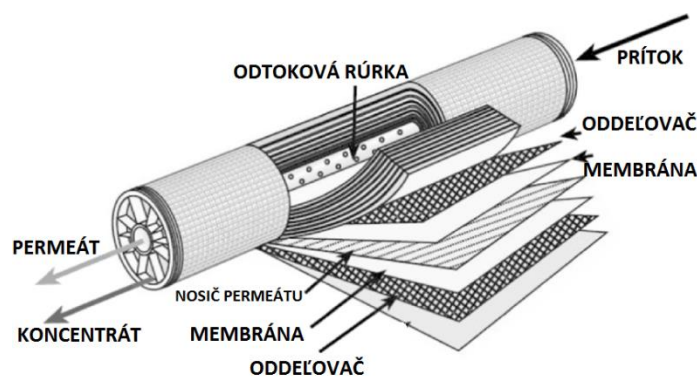
Klasifikácia podľa geometrie rozlišuje spôsob priestorového usporiadania membrán v jednotkách využívaných pri úprave vody. Tieto jednotky nazývame membránové moduly. Rozlišujeme štyri základné typy – doskové (Obr. 2.2), špirálové (Obr. 2.3), rúrkové (Obr. 2.4) a moduly s dutými vláknami. [1]

- Doskové moduly sú ploché membránové pláty prekladané podpornými panelmi, väčšinou v niekoľkých vrstvách za sebou. Medzi jednotlivými plátni sa nachádza priestor pre odtok permeátu. [3]



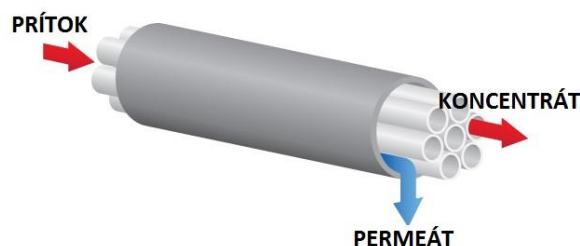
Obr. 2.2 Doskový membránový modul [6]

- Špirálové moduly sú v princípe doskové moduly špirálovo obtočené okolo odtokovej rúrky, ktorou odteká permeát. Vrstvy membrán sú striedané s vrstvami oddeľovačov, ktoré zaisťujú medzery medzi membránami pre tok tekutiny. [3]



Obr. 2.3 Špirálový membránový modul [7]

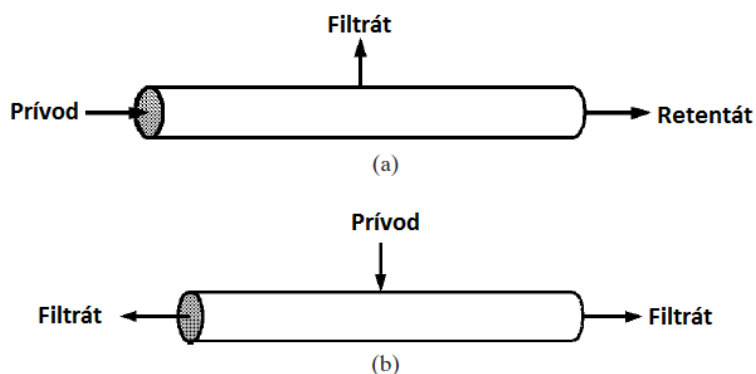
- Růrkové moduly sú paralelne usporiadané membrány v tvare trubiek s priemerom väčším ako 10 mm. Voda je privádzaná ich stredom, preniká stenou membrány a je odvádzaná medzerami medzi jednotlivými trúbkami do vývodu. [29]



Obr. 2.4 Růrkové membránový modul [8]

- Moduly s dutými vláknami sú podobné modulom trubkovým. Rozdiel je v rozmere použitých trubičiek. Ide o sústavy dutých vlákien s priemerom menším ako 1,5 mm. Prúdenie môže prebiehať dvomi smermi. Prítok môže byť privádzaný vnútrom vlákien a permeát odvádzaný priestormi medzi nimi (Inside-Out flow – Obr. 2.5.a) alebo opačne, prítok prichádzajúci medzerami medzi vláknami a odvod permeátu realizovaný dutinami vo vláknach (Outside-In flow – Obr. 2.5.b). [3]

Do kategórie modulov s dutými vláknami môžeme zaradiť aj takzvané kapilárne moduly (Obr. 2.6). Ide o hrubšie vlákna, v ktorých sa nachádzajú kapiláry. [1]



Obr. 2.5 Smer prúdenia v modulloch s dutými vláknami a.) Inside-Out flow, b.) Outside-In flow [3]



Obr. 2.6 Kapilárny modul [34]

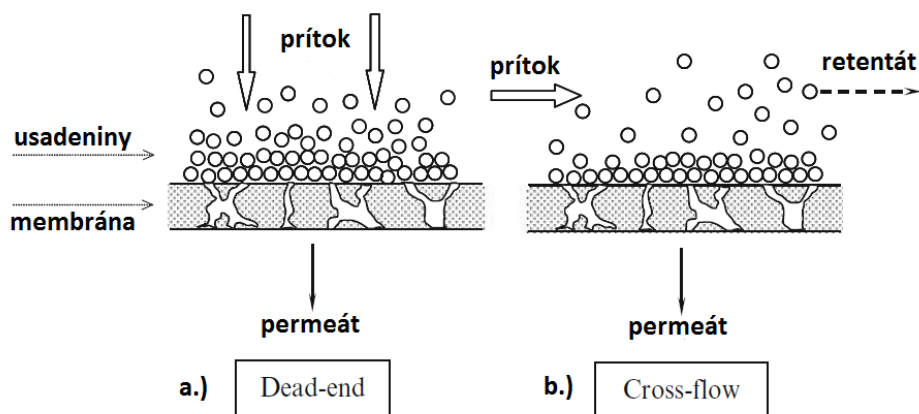
2.2 KLASIFIKÁCIA MEMBRÁNOVÝCH PROCESOV

Aj pri membránových procesoch existuje viac kritérií, na základe ktorých ich môžeme rozdeliť do kategórií. V tejto podkapitole bude priblížené ich delenie podľa aplikovanej hnacej sily a podľa hydraulického konfigurácie, v ktorej sú prevádzkované.

2.2.1 Klasifikácia podľa hydraulického konfigurácie

Podľa hydraulického konfigurácie delíme membránové procesy ale aj samotnú filtráciu na tri typy – „dead-end“, „cross-flow“ a „hybrid-flow“ filtrácia.

- „Dead-end“ filtrácia (Obr. 2.7.a) je základnou formou filtrácie a je nazývaná aj priamou. Celý prítok je hnaný cez membránu a vyfiltrovaná hmota je akumulovaná na povrchu membrány. Všetka voda privedená k membráne ňou prejde ako permeát, nevzniká teda žiadna odpadná voda. Ide o proces prebiehajúci v dávkach, keďže usadená hmota na membráne (alebo filtri) znižuje filtračnú kapacitu upchávaním. Je potrebný ďalší krok na odstránenie zachytených látok. Novšie a väčšie zariadenia majú zvyčajne inštalované samočistiace prvky, staršie a menšie zariadenia vyžadujú manuálne čistenie. Táto technika je veľmi užitočná pre koncentrovanie zlúčenín. [10]
- „Cross-flow“ filtrácia (Obr. 2.7.b) využíva konštantný turbulentný tok pozdĺž povrchu membrány, ktorý do určitej miery zabraňuje akumulácii látok na jej povrchu. V tomto prípade prechádza membránou len časť prítoku a zvyšok odteká spolu s membránou odmietnutými látkami ako retentát. Aj pri tomto móde je po čase nutné čistenie membrány ale vďaka kontinuálnemu odstraňovaniu usadenín je potrebné menej často. Vyžaduje si však komplexnejšie vybavenie v porovnaní s „dead-end“ módom a prevádzkové náklady sú vyššie kvôli energii potrebnej na cirkuláciu toku. [1]
- „Hybrid-flow“ filtrácia kombinuje princípy „dead-end“ a „cross-flow“ filtrácie. Proces má dve fázy: produkčná fáza a výplachová fáza. Počas produkčnej fázy je uzavretý odtok pre retentát a prebieha „dead-end“ filtrácia. Potom nastáva výplachová fáza - otvorí sa odtok a dochádza ku „cross-flow“ filtrácii, počas ktorej sa čiastočne odstránia usadené látky. [10]

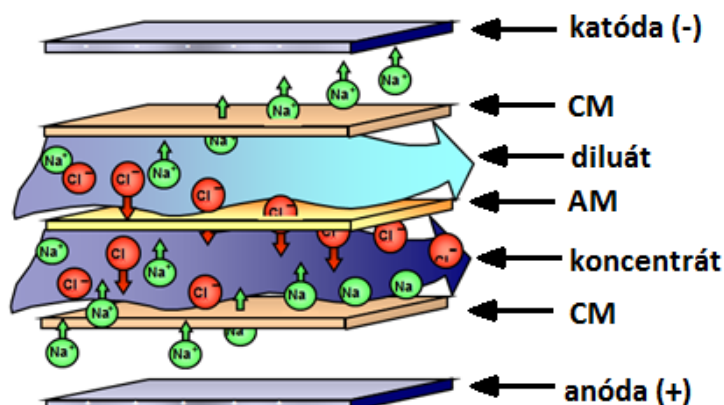


Obr. 2.7 a.) "Dead-end" filtrácia, b.) "Cross-flow" filtrácia [1]

2.2.2 Klasifikácia podľa hnacej sily

Podľa aplikovanej sily, ktorá proces poháňa, sa rozdeľujú membránové procesy na hnané gradientom tlaku, gradientom chemického potenciálu (koncentráciou), gradientom elektrochemického potenciálu a gradientom teploty.

- Gradient tlaku: Medzi procesy poháňané tlakom patria reverzná osmóza, nanofiltrácia, ultrafiltrácia, mikrofiltrácia, separácia plynov a pervaporácia. Pôsobením tlakového rozdielu pred a za membránou prechádzajú membránou nízkomolekulárne látky, zatiaľ čo väčšie molekuly a častice sú membránou zachytené. [11] Týmto procesom je venovaná väčšia pozornosť v samostatnej kapitole (2.3 Tlakové membránové procesy).
- Gradient chemického potenciálu (koncentrácia): Do tejto kategórie patria napríklad dialýza a osmóza. Osmóza bola prvým objaveným membránovým procesom. K tomuto objavu náhodou dospel Abbé Nollet už v roku 1748, keď nádobu s vodou a vínom prekryl močovým mechúrom ošipanej a pozoroval vyššiu permeabilitu vody. Týmto prvýkrát demonštroval semipermeabilitu. Procesy hnané koncentráciou môžeme opísať ako difúziu tekutiny (väčšinou vody) cez semipermeabilnú membránu z roztoku s nízkou koncentráciou rozpustených látok do roztoku s vyššou koncentráciou rozpustených látok, až kým nie je dosiahnutá rovnováha koncentrácie roztoku na oboch stranách. [1]
- Gradient elektrochemického potenciálu: Tieto procesy sa nazývajú elektromembránové procesy. Sú v nich aplikované iónovo výmenné alebo bipolárne membrány. Iónovo výmenné membrány môžu byť podľa náboja katexové (CM) a anexové (AM). Katexové membrány obsahujú záporne nabité, kyslé skupiny ($-\text{SO}_3^-$, COO^-), a tak umožňujú priechod kladne nabitým časticami a priechod záporných častíc je obmedzený. Anexové membrány obsahujú zásadité, kationové fixované skupiny ($-\text{NR}_3^+$, kde R je vodík alebo alkylová skupina). Umožňujú priechod záporne nabitým časticami a obmedzujú kladné častice. K týmto procesom patrí napríklad elektrodialýza (Obr. 2.8). [1]



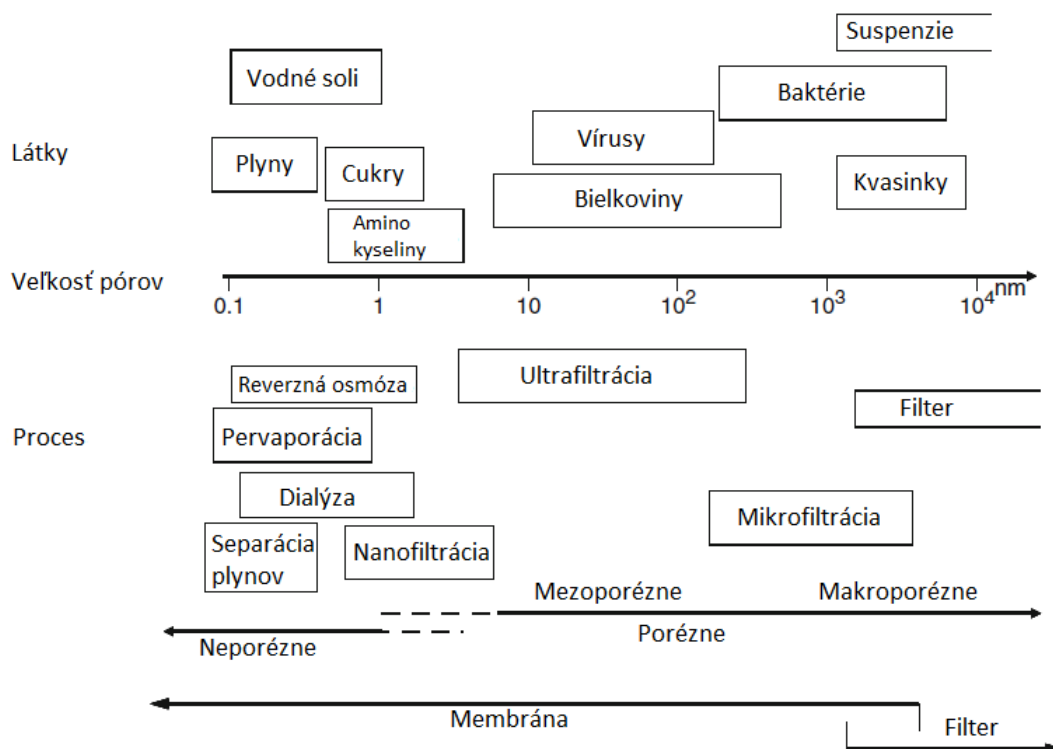
Obr. 2.8 Usporiadanie elektrodialyzačného zväzku [11], CM – katexová membrána, AM – anexová membrána

- **Gradient teploty:** K procesom hnaným teplotným gradientom patria napríklad termo-osmóza a membránová destilácia. Proces využíva teplotný rozdiel na dvoch stranách membrány. Jedna strana je teplá natoľko, že dochádza k odparovaniu alebo varu kvapaliny. Zároveň dochádza k zvýšeniu tlaku, ktorý tlačí molekuly pár cez membránu. Membrány používané pri týchto technológiách umožňujú prechod len parám. Po prechode membránou sa pary dostávajú do chladnej oblasti alebo na chladný povrch, čo spôsobí ich kondenzáciu. Tým sa získa vyčistená forma kvapaliny. Soľ a iné nečistoty, ktoré sa nepremenili na paru ostávajú v pôvodnej zmesi. Tento typ destilácie má bohaté uplatnenie v procese získavania sladkej vody zo slanej. [12]

2.3 TLAKOVÉ MEMBRÁNOVÉ PROCESY

Procesy, ktoré ako hnaciu silu využívajú tlakový rozdiel tvoria štyri hlavné typy – mikrofiltrácia (MF), ultrafiltrácia (UF), nanofiltrácia (NF) a reverzná osmóza (RO). Patria sem však aj separácia plynov (GS) a pervaporácia (PV). Spoločným prvkom je separačný element, ktorý sa pri nich používa - polopriepustná membrána. Každý z týchto procesov má odlišný rozsah veľkostí častíc, ktoré je schopný separovať (Obr. 2.9). Klesaním veľkosti separovaných častíc, klesá aj veľkosť pórov odpovedajúcich membrán. To znamená, že sa zvyšuje odpor membrány voči prenosu hmoty a pre dosiahnutie rovnakej produkcie permeátu, je nutné aplikovať stále vyšší tlak. Odpovedajúce používané tlakové rozdiely sú zhrnuté v Tab. 2.2. Avšak medzi jednotlivými tlakovými membránovými procesmi nie je možné určiť jednoznačnú ostrú hranicu. [11]

V tejto kapitole budú stručne priblížené jednotlivé typy tlakových membránových procesov.



Obr. 2.9 Vzťah medzi veľkosťou pórov membrán a separovanými látkami [1]

Tab. 2.2 Aplikovaný rozdiel tlaku pre jednotlivé membránové procesy [11]

Membránový proces	Tlakový rozdiel Δp (bar)
Mikrofiltrácia	< 4
Ultrafiltrácia	1 - 10
Nanofiltrácia	10 - 25
Reverzná osmóza	15 - 80

2.3.1 Mikrofiltrácia (MF)

Mikrofiltračné membrány sa používajú na odstraňovanie nečistôt v rozsahu veľkostí 0,1-10 μm (suspenzie, vírusy, baktérie). Separčný mechanizmus je založený na preosievaní. Membrána má póry určitej veľkosti a zachytáva častice s väčším rozmerom. Častice sú separované primárne na základe ich dimenzie, ale je možné membráne dodať náboj pre odstránenie elektricky nabitých častíc. Aplikovaný rozdiel tlaku pri MF je relatívne nízky (<4 bary), v porovnaní s ostatnými procesmi. Môže byť vyvolaný pôsobením tlaku na strane filtrovaného média alebo vytváraním podtlaku na strane filtrátu. [1]

Prietok mikrofiltračných membrán je obvykle vyšší ako 200 l/m²/h. Najčastejšie sú vyrobené z prírodných a syntetických polymérov alebo z keramiky. Majú využitie v potravinárstve a farmaceutike. [15]

Najviac sa však využívajú pri úprave pitnej vody, kde umožňujú jej dezinfekciu bez použitia dezinfekčných prostriedkov (chlór, ozón...). Novšie štúdie preukazujú, že MF membrány dokážu odstrániť aj vírusy z kontaminovanej povrchovej vody. Keďže vírusy sú oveľa menšie ako póry v MF membránach, tento jav bol pripísaný adsorpcii vírusov na časticiach hlíny, ktoré sú dostatočne veľké na to, aby boli zachytené mikrofiltrom. [14]

2.3.2 Ultrafiltrácia (UF)

Ultrafiltračné membrány, boli skúmané na laboratórnej úrovni už v roku 1907. V počiatku boli pripravované so zámerom produkcie vysoko-prietokových membrán pre reverznú osmózu (RO). Prvé komerčné UF membrány boli predstavené v šesťdesiatych rokoch minulého storočia ako vedľajší produkt vývoja asymetrických membrán pre RO. Na rozdiel od RO membrán, nie je generovaný významný osmotický tlak naskrz UF membránou, pretože porézna štruktúra, s pórmi o veľkosti 1-100 nm, dovoľuje mikročasticiam membránou prejsť. Medzi bežné látky, ktoré je ultrafiltrácia schopná zadržať patria cukry, biomolekuly, polyméry a koloidné častice. [16]

Tento typ membrány je často charakterizovaný tzv. MWCO (Molecular Weight Cut Off), čo je miera odstraňujúcich schopností membrány na základe atómovej hmotnosti a nie konkrétnej veľkosti pórov. Udáva najmenšiu molekulovú hmotnosť testovacieho polyméru, ktorý je z 90% zadržaný na membráne. MWCO pre ultrafiltráciu sa pohybuje v hodnotách 10 000-500 000 Da (Da = Dalton, jednotka molekulovej hmotnosti, jedna dvanástina molekulovej hmotnosti uhlíka). [17] [15]

Acetátcelulóza bola prvým základným materiálom v prvej dekáde ultrafiltrácie. Chemická a termálna stabilita acetátcelulózy je značne nízka a má relatívne úzky rozsah pH tolerancie. Taktiež je vysoko biologicky rozložiteľná. Z týchto dôvodov boli uvedené do produkcie UF membrány z iných polymérov ako polyakrylonitril, aromatické polyamidy, polysulfón a ďalšie. UF membrány pripravené z týchto materiálov preukazujú širokú škálu pH a teplotnej odolnosti. Sú pomerne odolné voči chlóru, čo významne rozšírilo možnosti ich využitia. [1]

Ultrafiltrácia je používaná na spracovanie olejových emulzií, spracovanie odpadných vôd z papierenského a textilného priemyslu, zahusťovanie bielkovín a spracovanie srvátky, ako proces predradený reverznej osmóze, znižovanie CHSK v odpadných vodách, čistenie odpadných vôd z povrchových úprav kovov a úpravu pitnej vody. [11] [15]

2.3.3 Nanofiltrácia (NF)

Pojem nanofiltrácia bol predstavený v druhej polovici osemdesiatych rokov minulého storočia firmou FilmTec ako „proces reverznej osmózy“, ktorý selektívne a zámerne umožňuje niektorým iónom rozpustených látok prechádzať membránou. O niekoľko rokov neskôr, iní vedci skúmajúci membrány začali tento pojem používať. V skutočnosti membrány so selektivitou medzi oblasťou reverznej osmózy a ultrafiltrácie existovali už v šesťdesiatych rokoch a boli kategorizované ako otvorená, voľná a nízkotlaká reverzná osmóza alebo tesná ultrafiltrácia. Na rozdiel od RO membrán, ktoré majú neporéznu štruktúru a transportný mechanizmus založený na difúzii roztoku, nanofiltračné membrány pracujú na rozhraní medzi poréznymi a neporéznymi membránami a na transport využívajú oba mechanizmy – preosievanie aj difúziu. Navyše väčšina NF membrán nesie aj povrchový náboj na podporu selektivity. Membrány majú veľkosť pórov približne 1 nm a bežnú hodnotu MWCO 200–1 000 Da. V niektorých prípadoch môže byť MWCO zvýšené až na 100 000 Da. [1]

NF membrány majú vysokú priepustnosť pre jednomocné soli (napr. NaCl, KCl) ale sú schopné eliminovať viacmocné soli takmer úplne a odstrániť relatívne malé organické zlúčeniny. Sú vhodné pre produkciu pitnej vody, pretože majú dobré charakteristiky pre zadržanie dvojmocných kationov, ako napríklad vápnik a horčík, takže sú schopné efektívne zmäkčovať vodu. [1]

Ich najväčšou nevýhodou je problém pri výrobe kontrolovať produkciu rovnakej veľkosti pórov a ich distribúciu v priestore. Taktiež sú veľmi náchylné na zanášanie, čo môže viesť k značným poklesom prietoku. [1]

Nanofiltrácia sa využíva v oblastiach zmäkčovania vody, eliminácie dusičnanových iónov z pitnej vody, odsolovanie produktov a medziproduktov v chemickom priemysle a čistenie odpadných vôd z textilného a papierenského priemyslu. [15]

2.3.4 Reverzná osmóza (RO)

Proces reverznej osmózy vyžíva opačný princíp klasickej osmózy, ktorá bola opísaná v predchádzajúcej kapitole. Pri klasickej osmóze dochádza k prenikaniu kvapaliny z prostredia s nižšou koncentráciou rozpustených látok do prostredia, kde je ich koncentrácia vyššia, aby došlo k ich vyrovnaniu. Aplikovaním tlaku na vstupnej strane membrány dochádza k prenikaniu kvapaliny (vody) proti koncentračnému spádu – zo strany, kde je

koncentrácia rozpustených látok vyššia na stranu s koncentráciou nižšou. Tým dochádza k separácii kvapaliny od nečistôt. [1]

Povrch polymérnych RO membrán je považovaný za neporézny, skladajúci sa z „dynamickej“ polymérnej siete, ktorá umožňuje prestup kvapaliny membránou. Keď sa hovorí o „póroch“ RO membrány, v skutočnosti ide o prechodné kanáliky v hutnej membráne. Tieto „póry“ majú v prípade reverznej osmózy veľkosť 0,5-1,5 nm. [11]

Medzi hlavné výhody reverznej osmózy patrí jej nízka energetická náročnosť. Hlavný nárok na energiu je pre vysokotlakové čerpadlo. Taktiež je potrebný relatívne malý priestor pre kompaktné, vysokokapacitné jednotky a preukazuje schopnosť dobrého zachytenia množstva bežných nežiadúcich zlúčenín. [13]

Reverzná osmóza má v praxi široké využitie v mnohých odvetviach. Odstránenie solí z morskej vody, výroba veľmi čistej vody pre elektrotechnický, farmaceutický priemysel a medicínske použitie, čistenie odpadných vôd z textilného a papierenského priemyslu, opakované využívanie vody a mnoho ďalších. [11]

2.3.5 Separácia plynov (GS – gas separation)

Prvý dôležitý vedecký objav GS membrán učinil J.K. Mitchell, keď v roku 1831 zistil, že rôzne plyny prenikajú prírodným kaučukom iným tempom. V roku 1945 sa začali vo veľkom aplikovať mikroporézne anorganické membrány na separáciu plynov pre oddelenie uránových izotopov pre vojenské účely. [1]

Membránový GS proces sa výrazne nelíši od procesov oddeľujúcich pevné látky od tekutín. Hlavným rozdielom je použitie inej fázy v prítoku. Zmes plynov je vháňaná do membránového modulu vysokým tlakom. Jedna zložka prechádza neporéznou membránou rýchlejšie a je koncentrovaná v prúde permeátu. Ostatné plyny sú odvádzané v prúde rezídua. V niektorých prípadoch môže byť zavedená aj recirkulácia permeátu alebo rezídua. [1]

2.3.6 Pervaporácia (PV)

Ide o relatívne nový membránový proces používaný pre separáciu tekutých zmesí. Pôvodne pojem pervaporácia vznikol ako kombinácia dvoch slov – „permselektivita“ (selektivita semipermeabilnej membrány) a „evaporácia“. Prvýkrát bol tento názov použitý v roku 1917 P. A. Koberom. Zložky prítomné v tekutej fáze v kontakte s kompaktnou membránou prechádzajú selektívne na stranu permeátu, kde sú zbierané vo forme pár. Takže v membráne prebiehajú oba spomínané javy - permeácia aj evaporácia. Proces sa javí podobný termo-osmóze a membránovej destilácii, ktoré boli v prechádzajúcej kapitole opísané ako poháňané teplotným rozdielom. Hlavnou odlišnosťou je práve to, že pervaporácia nie je založená na gradiente teploty. Vznik permeátu nie je závislý na teplotnom rovnovážnom stave medzi tekutinou a parou, ale na priepustnosti zložiek cez membránu, ktorá je definovaná ich rozpustnosťou a rýchlosťou difúzie v membráne. Je to proces energeticky nenáročný, ekologický a považuje sa za tzv. čistú technológiu. [18]

Následující kapitoly sa budú venovať primárne membránovým procesom a zariadeniam, ktoré sú najpoužívannejšie pri úprave pitnej vody – mikrofiltrácia (MF), ultrafiltrácia (UF), nanofiltrácia (NF) a reverzná osmóza (RO).

2.4 PRODUKCIA MEMBRÁNOU UPRAVENEJ VODY

Pre vyjadrenie množstva vody, ktoré je membrána schopná pri úprave vyprodukovať sa v praxi používa veličina flux (J). Vyjadruje prietok prislúchajúci jednotke plochy membrány. Čím väčší je aplikovaný tlakový rozdiel (ΔP), resp. transmembránový tlak (TMP), tým je prirodzene aj prietok väčší. Teda flux je priamoúmerný použitému rozdielu tlaku, čo je zrejmé aj zo vzťahu 2.4.1, ktorý je upravenou formou Darcyho zákona (Cheryan, 1998) [38]:

$$J = \frac{Q_{total}}{A} = \frac{\Delta P}{\mu * R_m} \quad /2.4.1/$$

J – flux [$m^3/m^2/h$; $l/m^2/h$]

Q_{total} – celkový prietok filtrátu [m^3/h ; l/h]

A – plocha membrány [m^2]

ΔP – rozdiel tlaku pred a za membránou [m^2]

μ – viskozita filtrovanej kvapaliny (voda)

R_m – hydraulický odpor membrány

Viskozita vody μ sa mení s teplotou. Pri vyšších teplotách klesá a dôsledkom je buď zvýšenie fluxu pri zariadeniach, ktoré pracujú pod konštantným tlakom, alebo pokles tlaku na prítoku, pri zariadeniach s konštantným fluxom. Opačný efekt nastane pri nízkych teplotách. Z tohto dôvodu je dôležité pri návrhu alebo voľbe zariadenia brať do úvahy možnú teplotnú škálu upravovanej vody počas roku, aby nedošlo k situácii, keď sa voda ochladí natoľko, že produkcia klesne pod požadovanú hodnotu. Pri parametroch zariadenia je spravidla flux uvedený pre teplotu 20°C. Hydraulický odpor membrány R_m závisí na fyzikálnych vlastnostiach membrány a je možné ho vyjadriť podľa vzťahu 2.4.2. [38]:

$$R_m = \frac{8 * \tau * \Delta z}{\pi * r^4 * P_{pore}} \quad /2.4.2/$$

τ – súčiniteľ nerovnosti

Δz – dĺžka pórov (hrúbka membrány)

r – polomer pórov

P_{pore} – počet pórov na jednotku plochy membrány

Hydraulický odpor R_m sa teda zväčšuje s rastúcou hrúbkou membrány a jej nerovnosťou. Naopak znižuje sa tým, čím je väčší počet pórov v membráne a čím sú tieto póry väčšie. [38]

Dôležitým prevádzkovým faktorom, je zanášanie membrány. Usadeniny rôzneho typu akumulované na povrchu membrány alebo v jej póroch, vytvárajú prídavný hydraulický odpor. Ten započítame do celkového hydraulického odporu ako súčet jednotlivých zložiek usadenín (organické, biologické....): $R_m = R_1 + R_2 + R_3...$ [38]

2.5 PREVÁDZKOVÉ PROCESY

Pre zaistenie správneho fungovania membránového zariadenia a zabezpečenie jeho životnosti je potrebné počas používania aplikovať niekoľko procesov. K týmto procesom patrí predúprava vody, regenerácia (mechanické pranie, chemické čistenie), testovanie celistvosti membrány a následná úprava vody (doúprava).

2.5.1 Predúprava vody

Predúprava sa používa na odstránenie základných kvalitatívnych nedostatkov vody. Voda, ktorá priteká na membránu je často predupravená aby sa minimalizovalo jej zanášanie. Napomáha optimalizácii regenerácie, predlžuje jej životnosť a predchádza mechanickému poškodeniu membrány. Môžu byť použité rôzne typy predúpravy v závislosti na kvalite vody a podmienkach objektu. Medzi bežne používané typy patrí predfiltrácia a chemická úprava. Pri vysokej kvalite surovej vody nemusí byť tento krok vôbec potrebný. [1]

2.5.2 Mechanická regenerácia

Počas membránovej filtrácie sa na povrchu membrány a v jej póroch hromadia zachytené látky a dochádza k jej zanášaniu. To má za dôsledok zníženie výkonu procesu úpravy vody. Zanesenie membrány je možné rozdeliť na tri typy – hydraulicky zvrátiteľné, chemicky zvrátiteľné a nezvrátiteľné. Na odstránenie hydraulicky zvrátiteľného zanesenia sa využíva proces mechanického prania. [22]

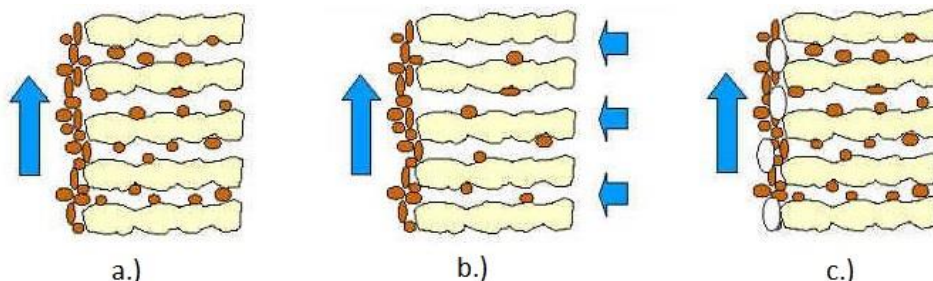
Proces mechanického prania membránových zariadení je veľmi podobný praniu konvenčných filtrov. Slúži na odstránenie akumulovaných látok na membráne. Každá membránová jednotka je praná samostatne tak, aby bol minimalizovaný počet jednotiek praných v rovnakom čase. Pranie prebieha periodicky podľa špecifikácií od výrobcu, v súlade s podmienkami konkrétneho objektu. Častejšie pranie udržiava vyššie hodnoty prietokov ale znižuje výkon systému, keďže počas prania jednotky neprodukujú upravenú vodu. Vo všeobecnosti platí, že prací cyklus je spustený, keď je presiahnutá určená hodnota tlakovej straty, zákalu vo filtrovanej vode, prípustnej doby filtračného cyklu alebo poklesu prietoku. Nanofiltračné membrány a membrány pre reverznú osmózu sú neporézne, a preto nie je možné pri nich aplikovať mechanické pranie, keďže ide o proces založený na preplachovaní pórov. [1] [2]

Existuje niekoľko metód na pranie membrán ako „forward flush“ (cross-flush), „backward flush“ a „air flush“.

- „Forward flush“ alebo cross-flush metóda (Obr. 2.10.a) prebieha tak, že dočasne dochádza ku „cross-flow“ filtrácii, ktorá bola opísaná v kapitole 2.2, nevzniká však pri nej permeát. Pranie prebieha v rovnakom smere akým prebieha separácia. Pracia voda prechádza systémom rýchlejšie ako pri produkčnej fáze, za vzniku turbulencií. Ich pôsobením sa uvoľnia usadeniny na stene membrány a sú odplavené. Častice usadené vo vnútri pórov, týmto spôsobom nie sú odstránené. [21]
- „Backward flush“ metóda (Obr. 2.10.b) je založená na obrátení smeru prúdenia. Voda priteká pod vysokým tlakom zo strany permeátu a preplachuje póry

membrány. Na tento úkon sa používa už vyčistená voda, pretože komora pre odtok permeátu musí ostať bez kontaminácie. [21]

- „Air flush“ alebo „air/water flush“ (Obr. 2.10.c) patrí medzi novšie metódy. Ide o metódu „forward flush“, s tým rozdielom, že prívodom je vháňaný aj vzduch, čo spôsobuje silnejšie turbulencie na odstránenie nečistôt na membráne. [21]



Obr. 2.10 Pranie membrány, .a)“Forward flush”, .b)“Backward flush”, .c)“Air flush” [21]

2.5.3 Regenerácia chemickými činidlami

K chemickému čisteniu sa pristupuje, keď nie je možné zanesenú membránu regenerovať pomocou mechanického prania. Keďže NF/RO membrány nie je možné čistiť mechanicky, chemické čistenie je pri nich primárnym procesom pre odstránenie nečistôt. Intervaly chemického čistenia sa výrazne líšia pre rôzne systémy, no pre všetky z nich je časom nevyhnutné. S výnimkou kazetových filtrov, ktoré sú navrhované ako jednorazové. [1]

Čistenie systému prebieha v nasledujúcich krokoch [24]:

1. Príprava čistiaceho činidla, prispôbenie pH a teploty.
2. Prečerpanie čistiaceho roztoku do modulu.
3. Recyklácia činidla a máčanie modulu v čistiacom činidle. Doba máčania modulu sa môže líšiť od niekoľkých minút, hodín až po dni.
4. Prepláchnutie modulu permeátom.

Existuje množstvo činidiel, ktoré sa pri chemickom čistení používajú a každé z nich je určené pre odstránenie špecifických látok. Základné rozdelenie odstraňovaných látok je na anorganické a organické. Výrobcovia a dodávatelia konkrétnych zariadení informujú o doporučených postupoch čistenia, ktoré by mali byť dodržané a často dodávajú aj vhodné činidlá. V nasledujúcom texte budú popísané bežné postupy, ktoré sa pri chemickom čistení membrán využívajú. [24]

Odstránenie anorganických látok

Čistiace postupy na odstránenie anorganickej hmoty z membrány využívajú buď nízke pH alebo chelačnú reakciu. [23]

- Nízke pH – Keďže veľké množstvo anorganických usadenín je viac rozpustné v kyslom prostredí, čistenie pri nízkej hodnote pH je pre ich odstraňovanie výhodné. Aj keď nemusí dôjsť k ich úplnému rozpusteniu, môžu sa čiastočne rozpustiť natoľko, že je

možné ich vypláchnuť z membrány. K tomuto sa najčastejšie používa kyselina chlorovodíková (HCl). Kyselina fluorovodíková (HF) sa môže využiť v prípadoch zanesenia membrány polymerizáciou oxidu kremičitého, ale je extrémne nebezpečná a musí sa používať s veľkou obozretnosťou. Zvykne sa tiež využívať kyselina sírová (H₂SO₄), no zvýšená koncentrácia síranu môže viesť k vytváraniu nerozpustných síranových zlúčenín. [23]

- Chelačné činidlá – Tieto chemikálie majú niekoľko iónovo nabitých zón v molekulárnej štruktúre. Záporné zóny sa viažu na kladné ióny v anorganickú usadeninu. Chelačné činidlo doslova vytiahne kladné ióny z pevnej štruktúry nežiaducej zlúčeniny, čím ju pomáha rozložiť na formu, ktorú je možné vypláchnuť. Dve bežné chelátové činidlá sú kyselina citrónová a kyselina etyléndiamíntetraoctová (EDTA). Kyselina citrónová sa používa na odstránenie železa a EDTA odstraňuje soli vápnika, bária a stroncia. Používajú sa väčšinou pri neutrálnom až vysokom pH, aby záporné zóny v chelačných molekulách zostali ionizované. [23]

Keďže odstránenie anorganických usadenín väčšinou zahŕňa aspoň čiastočný rozpad ich štruktúry, je dôležité aby čistiaci proces trval dostatočný čas. Pri značne zanesených systémoch môže čistenie trvať aj niekoľko hodín, poprípade dní. Spomenuté chemické reakcie prebiehajú oveľa rýchlejšie pri zvýšenej teplote činidla. Je však dôležité odsledovať, aby neboli prekročené limity dané výrobcom. To vyžaduje veľkú pozornosť hlavne pri použití činidiel s nízkym pH. Teplotné limity sú zvyčajne podstatne nižšie pre kyslú časť pH stupnice. [23]

Odstránenie organických látok

Odstránenie organických materiálov je úspešne docielené použitím kombinácie vysokého pH a čistiacich prostriedkov. Množstvo prirodzene sa vyskytujúcich organických zlúčenín obsahuje skupiny karboxylových kyselín. Pri neutrálnom pH majú vodíkový ión a teda molekula nemá náboj. Pri vysokých hodnotách pH vodíkový ión disociuje a molekula sa stáva kladne nabitou. Prítomnosť tohto náboja spôsobí, že molekula sa stane hydrofilnou. V prípade RO membrán vysoké pH ovplyvní samotnú membránu. Kyslé skupiny na molekulách membrány budú disociovať a výsledkom bude výraznejšie hydrofilná membrána. To môže byť nápomocné pri čistení membrány v závislosti na chemických vlastnostiach usadenej látky. Pre tento proces sa používa hydroxid sodný (NaOH) pridaný do práce vody. Pokiaľ je to možné, pri vysokom pH by mal byť ako pracia voda použitý permeát alebo deionizovaná voda. V neupravenej vode môžu byť prítomné vápnik (Ca²⁺) a hydrogenuhličitan (HCO⁻³), ktoré pri zvýšenom pH spôsobujú zrážanie uhličitanu vápenatého (CaCO₃). [23]

Ďalším používaným činidlom sú detergenty. Ich molekuly sú značne hydrofilné na jednom konci a hydrofóbne na druhom. To znamená, že čistiaci prostriedok sa správa ako spojka a umožní molekulám vody rozpustiť organické látky, s ktorými by za normálnych okolností nereagovali. Môže byť použité množstvo bežných čistiacich prostriedkov, avšak nie sú vhodné prostriedky založené na formule pre pranie oblečenia, ktoré často obsahujú oxidačné činidlá a môžu poškodiť membránu. Taktiež nie je vhodné používanie príliš vysokej koncentrácie čistiaceho prostriedku v čistiacom roztoku. Môže to mať za následok zvýšenie existujúceho problému zanesenia membrány. Hmotnostná koncentrácia by mala byť 0,1-5% . [23]

K organickej hmote zachytenej na membráne patria aj biologické organizmy, ktoré sa môžu v upravovanej vode vyskytovať. Niekedy pre ich odstránenie vysoké pH a čistiace prostriedky nepostačujú a pristupuje sa k dezinfekcii. Na ich usmrtenie a rozpad biomasy je dostupných mnoho produktov, určených práve na tento účel. Môžu byť použité slabé roztoky peroxidu vodíka alebo chlórnanu sodného. Ide však o silné oxidačné činidlá a môžu poškodiť niektoré membrány (napr. polyamidové). Dezinfekčné činidlo sa zvyčajne používa oddelene od čistiaceho roztoku. Tak ako pri čistení pri nízkom pH, zvýšená teplota urýchľuje proces aj pri čistení pri vysokom pH. Aj v tomto prípade je potrebné sledovať teplotné limity od výrobcu, v závislosti na pH roztoku. [23] [24]

Z dôvodu vysokej rozmanitosti možných usadenín, je často nevyhnutné použiť kombináciu činidiel pre chemické čistenie. Najčastejším spôsobom pri prevádzke je použitie jednej kyslej a jednej zásaditej chemikálie pre chemické čistenie. Na trhu je aj množstvo prípravkov, špeciálne určených na odstraňovanie niektorých látok. Môžu byť užitočné v prípadoch, kde sú konvenčné chemikálie neefektívne. Napríklad za určitých podmienok sa preukázali enzymatické čističe účinné na rozpustenie organických kontaminantov. Možnosti chemického čistenia sú značne obmedzené pre membrány, ktoré netolerujú oxidačné činidlá a extrémne pH hodnoty. Je potrebné vždy dbať na pokyny od výrobcu alebo dodávateľa. Niektoré účinky chemického čistenia na membránu je možné pozorovať aj počas poloprevádzky. [1]

Izolácia čistiacich chemikálií od upravenej vody je dôležitou otázkou pre membránové systémy. Je potrebné dôkladne prepláchnuť membránový modul po čistiacom cykle pred uvedením do filtračnej funkcie. Voda prechádzajúca membránou by mala byť po čistení odvádzaná do odpadu, až kým kvalita filtrovanej vody nedosiahne produkčné parametre. Toto množstvo odpadnej vody môže byť značne vysoké v prípadoch, kde sa používajú povrchovo aktívne látky. Pre MF/UF systémy je bežné recyklovať až 90% čistiacich chemikálií, čo znižuje chemický odpad aj náklady na čistenie. Pri NF/RO systémoch je recyklácia čistiacich prostriedkov zriedkavá, pretože roztoky použité na čistenie pri opakovanom použití akumulujú rozpustené zložky a tým sa znižuje efektívnosť čistiacich činidiel. [1]

2.5.4 Testovanie celistvosti membrány

Ako všetky zariadenia, tak aj membránové moduly podliehajú poruchám. Môže k nim dôjsť ešte pred uvedením do funkcie nesprávnou manipuláciou alebo inštaláciou, častejšie k nim však dochádza po určitom čase prevádzky, napríklad chemickou alebo biologickou degradáciou. Je dôležité sledovať možné poškodenia a netesnosti, ktoré by umožnili upravovanej vode obísť membránu, čím by nedošlo k zachyteniu kontaminantov. Navyše je potrebné mať o spoľahlivosti systému podklady, ktoré slúžia ako dôkaz o dodržiavaní požadovaných limitov. Pre tento účel boli vyvinuté rôzne monitorovacie techniky, ktoré sa delia na priame a nepriame metódy. Priame metódy sú fyzikálne testy, prebiehajúce na membránovej jednotke pre určenie prípadných porúch a ich zdrojov. Nepriame metódy sú náhradné merania, ktoré zahŕňajú monitorovanie kvality filtrovanej vody. Výrazný pokles v kvalite filtrátu môže značiť poruchu systému. [26]

Priame metódy testovania

Priame metódy sú nedeštruktívne techniky. Poskytujú priame informácie o spoľahlivosti membrány, nemôžu však prebiehať keď je membránový systém v prevádzke. Nie je teda možné

ich kontinuálne použitie a čím častejšie sú realizované, tým väčší dopad to má na celkovú produktivitu. Je niekoľko typov týchto testov, najčastejším je test tlakového poklesu. Takmer všetky momentálne dostupné MF a UF systémy sú schopné tento test spustiť automaticky v pravidelnom intervale. Na NF a RO membránach prebieha podobný test pomocou vákua. V súčasnosti väčšina špirálových modulov nie je schopná uskutočniť tento test automaticky počas prevádzky. Povinná početnosť týchto testov je určená legislatívou konkrétnej krajiny, niektoré zdroje odporúčajú preventívne ich realizovať raz denne. [1]

- Test poklesu tlaku – Pri tomto teste je uzavretý prívod vody a odvod koncentráту. Odvod pre permeát ostáva otvorený. Do systému je vháňaný stlačený vzduch a v závislosti na čase je sledovaný tlakový úbytok. [26]
- Test poklesu vákua – Odvod permeátu a membránová jednotka sú uzavreté a následne je na strane permeátu vyvolané vákuum. Rýchlosť poklesu aplikovaného vákua je monitorovaná. Pre RO membrány pokles väčší ako 10 kPa/min signalizuje významnú poruchu. [26]

Nepriame metódy testovania

Primárne ide o monitorovanie bežných ukazovateľov kvality vody. Nepriame metódy nie sú také presné ako priame ale ich výhodou je, že umožňujú kontinuálne monitorovanie. Zvyčajne ak nepriama metóda naznačuje potenciálny problém, je realizovaný test priamou metódou pre presnejšie určenie, či došlo k poruche. Medzi parametre sledované pri nepriamych metódach patria zákal, obsah celkového organického uhlíku, obsah síranu a elektrická vodivosť. [1] [26]

2.5.5 Doúprava vody

Proces doúpravy vody súvisí so správnym fungovaním membránového systému. Týka sa hlavne NF a RO membrán, pretože na rozdiel od MF a UF membrán odstraňujú nie len pevné suspendované látky, ale aj rozpustené zložky. To má významnejší vplyv na chemické vlastnosti vody. Napríklad predúprava vody predchádzajúca NF/RO procesom často zahŕňa dávkovanie kyseliny na zníženie pH, čo spôsobuje vyššiu rozpustnosť anorganických nečistôt. Časť uhličitánov a hydrogenuhličitánov je premenených na kvapalný oxid uhličitý, ktorý membrána nezadrží. Semipermeabilnou membránou prechádzajú aj iné rozpustené plyny (napr. sirovodík). Výsledkom toho sú nevyhovujúce vlastnosti filtrátu, ktorý má nízke pH a zvýšené hodnoty oxidu uhličitého, poprípade iných plynov, ktoré môžu mať vplyv na chuť a zápach vody. Úlohou doúpravy vody je odstrániť tieto nedostatky v kvalite filtrátu, spôsobené membránovým procesom, čiže najčastejšie úprava pH a odstránenie plynov (napr. aerácia). [1]

Membránové procesy vyslovene nevyžadujú dezinfekciu vody, ale aj tak k nej väčšinou dochádza v rámci objektu úpravy vody. Dezinfekcia býva posledným krokom úpravy pred vstupom vody do akumulácie alebo distribučného systému. Takže v množstve prípadov nastáva až po membránovom procese, aj z dôvodu ochrany membrány. Poprípade môže byť aplikovaná pred membránou (primárna dezinfekcia) a aj za ňou (sekundárna dezinfekcia), pri membránach, ktoré sú odolné voči oxidačným činidlám. Po NF/RO procesoch, ak je dezinfekcia dávkovaná pred úpravou pH permeátu, môže mať prídavný benefit - oxidáciu síranov, čím odstraňuje riziko ich zrážania a upravuje nežiaduci zápach a chuť. [1]

3 IMPLEMENTÁCIA MEMBRÁNOVÉHO ZARIADENIA DO SYSTÉMU ÚPRAVY PITNEJ VODY

Cieľom tejto kapitoly je poskytnúť základné informácie o aplikácii membránových technológií do systému úpravy vody. Popísané budú základné kritériá pri výbere vhodného zariadenia. Časť kapitoly je venovaná poloprevádzke, ktorá je súčasťou spustenia takéhoto zariadenia. Overuje jeho účinnosť a vhodnosť návrhu pred zavedením do prevádzky v plnom rozsahu.

3.1 VÝBER VHODNÉHO ZARIADENIA

Táto kapitola je zameraná na výber zariadenia pre úpravu pitnej vody, preto bude výber zúžený na procesy, ktoré sa pri úprave vody používajú najbežnejšie – tlakové membránové procesy, konkrétne mikrofiltrácia (MF), ultrafiltrácia (UF), nanofiltrácia (NF) a reverzná osmóza (RO). Hlavným parametrom pri zvažovaní membránového procesu pri úprave vody je veľkosť častíc, ktoré je potrebné odstrániť. V prechádzajúcej kapitole bolo uvedené, že každý membránový proces odstraňuje látky inej veľkosti. Ich hranica nie je presne daná, preto ďalší parameter, ktorý zvažujeme je požadovaný prietok. Na základe týchto parametrov môžeme výber zúžiť na dve skupiny MF/UF a NF/RO. Špirálové NF a RO membránové moduly sú štandardizované natoľko, že membrány od rôznych výrobcov sú navzájom zameniteľné a systémový návrh je v podstate jednotný. Takže pri výbere vhodnej membrány je primárne posúdenie zamerané na selekciu materiálu, ktorý poskytuje požadovanú produkciu, odolnosť voči zanášaniu a odstraňovanie nánosov. [19]

Posúdenie pre MF/UF systémy je o niečo komplexnejšie. Ich dizajn sa môže v rámci výrobcov výrazne líšiť. Komerčne dostupné systémy môžu využívať tlak alebo podtlak ako hnaciu silu a môžu byť navrhnuté pre smer toku „inside-out“ alebo „outside-in“, vo vzťahu k vláknovým zväzkom. Rôzne materiály membrán sa líšia v zásadných vlastnostiach, ako efektivita odstraňovania nečistôt, pH tolerancia a tolerancia voči oxidantom. Membrány z odlišných materiálov majú aj rôzne stupne compatibility s chemikáliami používaných na úpravu vody ako koagulanty a práškové aktívne uhlie (PAC), čo ovplyvňuje ich výkon a cenu. Je dôležité pri výbere zvážiť tieto charakteristiky membránových MF/UF systémov. Napríklad, ak je voda predchlórovaná, membrána ktorá nie je zlučiteľná s chlóróm je nevhodná. Pri voľbe membrány je potrebné brať do úvahy nasledovné otázky [17]:

1. Aké sú ciele úpravy týmto zariadením?
2. Aké existujú prevádzkové obmedzenia?
3. Bol tento typ membrány použitý za podobných podmienok na inom objekte?
4. Aká je pH tolerancia membrány? Je zlučiteľná s touto aplikáciou?
5. Je membrána zlučiteľná s chemikáliami predúpravy?
6. Je membrána zlučiteľná s pevnými látkami a celkovým obsahom organického uhlíka v surovej vode?
7. Spĺňa membrána legislatívu a požadované certifikácie?
8. Má dodávateľ skúsenosti so zariadením pri úprave vody podobných vlastností?
9. Vyžaduje systém ďalšie položky ako náhradné diely a čistiace chemikálie?
10. Sú prítomné netypické prevádzkové podmienky, ktoré je potrebné brať do úvahy, ako významné požiadavky na energiu, častá výmena membrán alebo významné použitie chemikálií?

Otázku, ktorú je navyše potrebné posúdiť pri MF/UF membránach je už spomínaná špecifickosť v rámci výrobcov. Moduly majú väčšinou odlišný dizajn a nie sú zameniteľné. Preto pri potrebe náhrady jednotky z dôvodu poruchy alebo konca životnosti, nastáva obmedzenie pre získanie toho istého modulu od rovnakého dodávateľa. [1]

Pri voľbe zariadenia je neprehliadnuteľné aj posúdenie potrebných finančných nákladov. Je dôležité brať do úvahy nielen obstarávaciu cenu, ale aj náklady na celý životný cyklus systému. To zahŕňa energie, chemikálie, čistiaci režim a výmenu membrán. Pre určenie výšky nákladov je spravidla potrebné pozorovanie počas poloprevádzky v trvaní aspoň 4-6 mesiacov, aby boli zachytené sezónne zmeny. [20]

3.2 POLOPREVÁDZKA

Poloprevádzka prebieha priamo na mieste, kde je predpokladané využitie daného membránového zariadenia. Jej úlohou je zhromaždenie informácií o kvalite upravenej vody a prevádzkových parametroch, aby bolo možné overiť voľbu typu zariadenia a nadimenzovať membránový proces. Dôležité je, aby testovací proces reprezentoval systém v plnom režime. Napríklad, ak je súčasťou systému predúprava vody, tak aj skúšobný proces by mal prejsť rovnakou predúpravou. Proces by mal taktiež napodobovať hydraulické vlastnosti systému. To nie je vždy možné dodržať, v takom prípade je nutné, aby bola zahrnutá metodika prevedenia z testovacieho systému do režimu v plnom rozsahu. Získané dáta pomáhajú odhaliť nepredpokladané komplikácie, ktoré by bez tohto testovania mohli byť prehliadnuté. Tiež slúži na oboznámenie obsluhy s membránovým zariadením. [1]

3.2.1 Plánovanie

Správne načasovanie je ďalším dôležitým aspektom poloprevádzky. Jeden z faktorov, ktorý musí byť zvážený je sezónna odlišnosť kvality vody, najmä pri povrchovej vode. V rámci roka zmenou ročných období a privalových dažďov sa výrazne mení teplota, množstvo rias, chemické zloženie, chuť, zápach a zákal. [1] [20]

- Leto - V lete je najvyššia potreba vody, takže membránový filter musí v tomto ročnom období produkovať dostatočné množstvo. Pri povrchovej vode sa zároveň zvyšuje jej teplota, čo má vplyv na viskozitu vody. Viskozita klesá so zvyšujúcou sa teplotou vody, čiže v tomto období by prietok membrány mal dosahovať najvyššie hodnoty. Zároveň však v teplejšej vode býva väčšie množstvo rias, čo môže spôsobiť problém pre membránový systém. [1] [28]
- Jeseň - Na jeseň v oblastiach s listnatými lesmi môže dôjsť k zvýšeniu organických látok v povrchovej vode, spôsobeného rozkladom spadnutého listia. Taktiež sa môže prudko zvýšiť zákal. Ochladenie vzduchu a vietor spôsobujú, že v nádržiach k povrchu stúpa voda z hĺbky, čo má za následok zmenu chuti a zápachu a problémy s obsahom železa a mangánu. [20]
- Zima - V zimných mesiacoch je teplota vody najnižšia a teda aj klesá prietok membrán, zároveň však aj potreba vody. Zima nie je bežným testovacím obdobím. Výrobcovia membrán poskytujú relatívne presné korekcie na správanie membrán pri nízkych teplotách, ktoré môžu byť využité. [28]

- Jar - Jarné mesiace sa bežne vyznačujú zvýšením teploty vody a zákalu, v dôsledku topenia snehu a jarných zrážok. Taktiež môže dôjsť k stúpaniu vody v nádržiach, čo vedie k zníženiu jej kvality. [20]

Poloprevádzkové testovanie by malo prebiehať v období, keď je kvalita vody najhoršia. Potom parametre navrhnuté na základe tohto pozorovania (prietok, frekvencia čistenia) budú aplikovateľné konzervatívne po celý rok. Ak je to časovo a finančne možné, výhodné je testovanie počas viacerých ročných období. [1] [20]

3.2.2 Trvanie poloprevádzky

Dĺžka skúšobnej prevádzky je všeobecne doporučená aspoň na tri cykly. Jeden cyklus pre MF/UF membrány s dutými vláknami je približne 30 dní nepretržitej prevádzky. Počas prvého cyklu prebieha zabehnutie membrány do prevádzky. Druhý cyklus sa využíva na optimalizáciu a zlepšenie prevádzky. Počas tretieho cyklu sa pozoruje, či prevádzkové parametre ostávajú nemenné. Nové membrány majú väčšinou lepší výkon ako membrány, ktoré boli už zanesené a dodatočne čistené. Preto je výhodné sledovať vyšší počet cyklov na pozorovanie dôsledkov opakovaného zanášania a čistenia na výkon membrány. [1]

3.2.3 Optimalizácia parametrov

Poloprevádzka poskytuje čas na optimalizáciu prevádzkových parametrov, z ktorých najdôležitejšími sú membránový prietok a produktivita systému, pretože určujú počet membránových jednotiek potrebných pre plnú prevádzku. Fungovanie pri vysokých prietokoch zvyšuje zanášanie a vyžaduje častejšie čistenie. Časté čistenie znižuje celkovú produktivitu, keďže predstavuje čas, počas ktorého zariadenie nie je v prevádzke a navyše je k čisteniu potrebná už upravená voda, ktorá sa tým stáva odpadom. Navyše chemické čistenie môže byť operáciou vyžadujúcou obsluhu a manipuláciu s nebezpečnými chemikáliami. Zároveň produkuje odpad, ktorý môže byť náročný na spracovanie. Je preto potrebné nájsť optimálne hodnoty, ktoré zaručia účinnú a ekonomickú úpravu vody. Pre správnu optimalizáciu je dôležité, aby bol počas určitého časového úseku upravovaný len jeden parameter pre efektívne odsledovanie účinku jeho zmeny. [27]

Výrobcovia membrán poskytujú doporučené hodnoty prietokov. Pokiaľ je to časovo možné, odporúča sa začať poloprevádzku na konzervatívnej hodnote prietoku a zvyšovať ho na základe sledovania zanášania membrány. [1]

3.2.4 Monitorovanie parametrov

Počas poloprevádzky by mali byť monitorované parametre, ktoré sa dajú rozdeliť na prevádzkové parametre a parametre kvality vody. Medzi prevádzkové parametre, ktoré by mali byť podľa možností sledované kontinuálne, patria doba chodu, tlak (prítok, filtrát, koncentrát), prietok (prítok, filtrát, koncentrát) a teplota (prítok alebo filtrát). Monitorované parametre kvality vody sú rôzne vzhľadom na konkrétnu situáciu a kvalitu surovej vody. Počas doby poloprevádzky by mala byť venovaná veľká pozornosť aj pravidelnému testovaniu celistvosti membrány. [1]

3.2.5 Vyhodnotenie poloprevádzky

Po ukončení poloprevádzky, by mala byť spracovaná správa, v ktorej sú zhrnuté postupy a výsledky testov. Musí byť dostatočne podrobná, aby na jej základe bol možný návrh parametrov pre celý systém v plnej funkčnosti. Takáto správa obsahuje sledované dáta prietokov, prania, chemického čistenia, skúšok celistvosti membrány, kvality vody. Špeciálnu pozornosť je potrebné jej venovať pri výskyte nežiaducich alebo neočakávaných výsledkov. Pokiaľ výsledky spĺňajú požadované ciele, nasleduje inštalácia membránového zariadenia v plnom rozsahu. [28]

4 MEMBRÁNOVÁ FILTRÁCIA NA ÚPRAVNÍCH VODY V ČR

Membránové procesy pri úprave pitnej vody vo svete sa radia medzi bežne používané technológie. Avšak v Českej republike zatiaľ nie sú rozšírené a patria stále medzi rarity. Ich používanie je obmedzené aj českou legislatívou. Technológie úpravnej vody sa riadia vyhláškou Ministerstva zdravotníctva č.409/2005 Sb. O hygienických požiadavkách na výrobky prichádzajúci do priameho styku s vodou a na úpravu vody (upravená vyhláškou č.339/2015 Sb.). Táto vyhláška uvádza technológie povolené pre úpravu vody a membránové technológie v nej nie sú uvedené. Aj napriek tomu je možné membránové procesy zaradiť do procesu úpravy vody, no je potrebné požiadať o povolenie príslušné štátne orgány. [30]

Prvým projektom väčších rozmerov, ktorý využil možnosť membránového procesu bola inštalácia ultrafiltračného zariadenia na úpravni vody Březová. Tento projekt sa začal realizovať v roku 2013 a vo funkcii je od roku 2016. Odvtedy sa rozhodlo túto technológiu zaradiť do systému úpravy vody niekoľko ďalších prevádzkovateľov v Českej republike. [35]

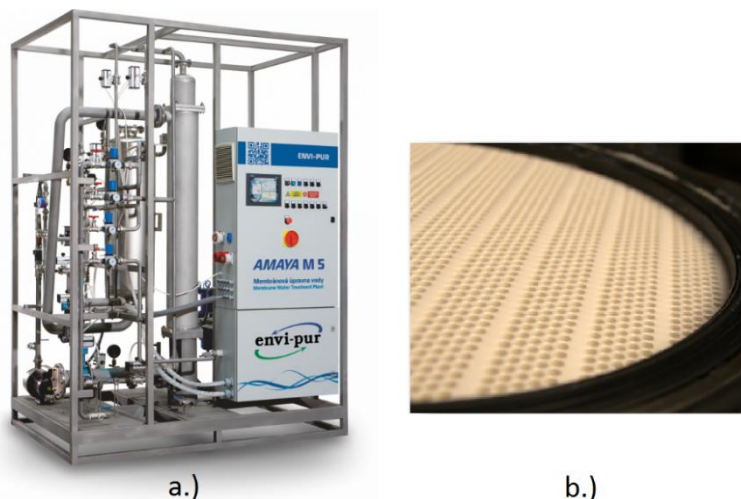
V tejto kapitole sú uvedené niektoré príklady úpravnej, na ktorých boli membránové procesy aplikované.

4.1 ÚV TRNOVÁ

Obec Trnová sa nachádza v okrese Praha-západ, v Stredočeskom kraji s približne 200 obyvateľmi. Zdrojom vody je pre túto obec rieka Vltava. Dodávaná upravená voda dlhodobo nespĺňovala požiadavky pre pitnú vodu a prevádzkovateľ, ktorým bola súkromná spoločnosť, nerealizoval potrebné opatrenia. Kvalita vody sa zhoršila natoľko, že Krajská hygienická stanica v roku 2015 zakázala pitie tejto vody a koncom roka zakázala používanie vody aj na umývanie. Obec podala žiadosť na Ministerstvo zdravotníctva na uskutočnenie technického auditu. Jeho výsledky boli značne nepriaznivé a v januári 2016 sa prevádzkovateľom stala spoločnosť Vodovody a kanalizace Beroun. Nový prevádzkovateľ okamžite začal podnikáť kroky k zlepšeniu kvality pitnej vody. [31]

Začala príprava pripojenia obce na privádzač vody z Prahy. Realizácia tohto projektu trvala necelé tri roky. Počas tejto doby bolo potrebné zabezpečiť dodávku kvalitnej vody obyvateľom z nevyhovujúcej úpravne, ktorá prešla rekonštrukciou stávajúcich filtrov. Nebolo však možné nimi viesť celý potrebný prietok a preto bola linka doplnená o mikrofiltračnú jednotku. [32] Surová voda, ktorá prichádzala na úpravňu bola rozdelená a jedna časť prechádzala rekonštruovanou linkou s konvenčnými filtermi. Druhá časť bola odvedená do doplneného zariadenia s mikrofiltračnou membránou, ktorú si prevádzkovateľ prenajal na potrebnú dobu, kým sa nezrealizuje nový vodovodný privádzač pre obec. Mimo špičkových odberov v letných mesiacoch, mikrofiltračná jednotka produkovala až 95% celkovo upravenej vody. Ako mikrofiltračné zariadenie bola použitá jednotka AMAYA 5.1 (Obr. 4.1.a). Ide o jeden mikrofiltračný keramický element s predradeným stupňom koagulácie. Ako koagulant bol použitý polyaluminiumchlorid (PAX 18). Na vstupe do jednotky sú umiestnené dva filtre, ktoré slúžia na hrubé predčistenie. Za nimi je dávkovaný koagulant. Následne voda prechádza trubkovým flokulátorom, v ktorom dochádza k zrážaniu suspenzie po dobu cca 1 minúty. Za ním je umiestnená samotná keramická membrána. Element (Obr. 4.1.b) je tvorený 2 000

kanálíky s priemerom 2,5 mm, ktorými prechádza voda a prebieha v nich priama filtrácia („dead-end“). Veľkosť pórov membrány je 0,1 μm a jej plocha je 25 m^2 . Maximálny výkon modulu je 5 m^3/h (flux = 200 $\text{l}/\text{m}^2/\text{h}$). Zariadenie v ÚV Trnová bolo prevádzkované pri prietoku 4 m^3/h (flux = 160 $\text{l}/\text{m}^2/\text{h}$). Prevádzka bola plne automatizovaná a sledované dáta boli diaľkovo odosielané. [33] [34]



Obr. 4.1 Mikrofiltračné zariadenie AMAYA a.) jednotka b.) keramický element [34]

Regenerácia membrány prebieha spätným praním a chemickým čistením. Na ÚV Trnová bola priemerná dĺžka filtračného cyklu medzi jednotlivými mechanickými prániami pri štandardnej kvalite surovej vody (zákal = 5 FNU) 4-6 hodín a chemické pranie prebiehalo raz denne. Počas sledovaného obdobia nastalo zhoršenie kvality surovej vody (zákal = 70 FNU) ako následok topenia snehu a filtračný cyklus sa skrátil na 2-3 hodiny. Z celkového objemu vody, ktoré úpravňa vyrobila sa priemerne 0,5% využilo na mechanické a chemické pranie. Použité membránové zariadenie sa preukázalo ako veľmi účinné. Účinnosť odstránenia CHSK_{Mn} dosahovala 87%. Keďže zdrojom je povrchová voda z rieky Vltava, v surovej vode boli hodnoty počtu organizmov pomerne vysoké, až 4 000 jedincov/ml. Účinnosť mikrofiltrácie pre ich odstránenie bola takmer 100%. [33]

V súčasnosti je ÚV Trnová už odstavená a obec je od septembra 2019 zásobovaná privádzačom z Prahy. Po obnove jej prevádzka trvala síce len necelé tri roky, ktoré však boli prínosné na skúsenosti a rozšírenie povedomia o možnosti membránovej technológie na českom trhu a stala sa inšpiráciou pre ďalšie prevádzkové spoločnosti a vlastníkov vodovodných sietí. [32]

4.2 MOBILNÁ ÚPRAVNÁ VO VYŠŠOM BRODE

Mesto Vyšší Brod leží v okrese Český Krumlov v Juhočeskom kraji. Má niekoľko povrchových, aj podzemných zdrojov a všetky z nich vyžadujú úpravu vody. Takmer po celý rok sú tieto zdroje schopné zabezpečiť dodávku vody pre celé mesto. Avšak v letných suchých mesiacoch klesá ich výdatnosť. Toto obdobie sa zároveň vyznačuje zvýšenou turistickou návštevnosťou, čo vedie k nárastu potreby vody. Ďalší problém nastáva po výdatných privalových dažďoch, ktoré spôsobujú zhoršenie kvality povrchových zdrojov do takej miery, že nastávajú situácie, keď musí byť úpravňa odstavená, kým sa kvalita vody nezlepší. V prípade nutnosti je možnosť nakupovať vodu od miestneho opátstva. Jeho zdroje sú však tiež obmedzené. Situáciu bolo potrebné riešiť a preto spoločnosť ČEVAK, ktorá prevádzkuje vodovod, spolu s mestom pristúpili k skúšobnej inštalácii mobilnej membránovej úpravne

v letnej sezóne 2018. Toto zariadenie poskytovalo niekoľko výhod ako možnosť sezónneho využitia, neboli potrebné veľké stavebné úpravy a rozmerovo ho bolo možné umiestniť do limitovaných priestorov úpravne. Tento projekt využil referencie z Úpravne vody Trnová, poloprevádzkového testovania na úpravni vody v Strašiciach a využitia mobilnej membránovej úpravne pri majstrovstvách sveta juniorov v kanoistike 2017. Ako vhodné zariadenie bola zvolená jednotka AMAYA 5.2. Ide o zariadenie s rovnakými parametrami a materiálmi ako jednotka AMAYA 5.1, ktorá bola použitá na ÚV Trnová a je opísaná v predchádzajúcej kapitole. Rozdielom je, že vo Vyššom Brode bol zvolený koagulant PAX 19 (polyaluminiumchlorid - vodný roztok). [36]

Mobilná membránová úpravňa bola uvedená do funkcie pre úpravu povrchovej vody. Z dôvodu meniacej sa kvality vody bolo zavedené kontinuálne meranie zákalu a obsluha každý deň stanovila hodnotu $CHSK_{Mn}$. Táto hodnota bola zadaná do systému, ktorý si dopočítal dávku potrebného koagulantu. Priemerná účinnosť jednotky pri odstraňovaní $CHSK_{Mn}$ bola 85-95%. Jednotka pracovala pri prietoku $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$ (flux = $180 \text{ l/m}^2/\text{h}$). Pri takejto prevádzke bola dĺžka filtračného cyklu 3-5 hodín, následne si vyžadovala mechanické pranie, spúšťané automaticky na základe poklesu transmembránového tlaku. Pre úplné obnovenie permeability bolo potrebné chemické čistenie, ktorého interval bol približne raz za dva dni. Zariadenie bolo v prevádzke v období 12.07. až 04.09. 2018. Počas tejto doby jednotka vyprodukovala $4\,905 \text{ m}^3$ vody a z toho 1,2% bolo využitých pre mechanické a chemické pranie. Pre porovnanie, ÚV Vyšší Brod pre svoju prevádzku spotrebuje cca 8% vody, ktorú vyrobí. Na chemické čistenie sa používal ako zásadité činidlo 14% chlórnan sodný a počas obdobia prevádzky sa ho spotrebovalo 0,51 l. Ako kyslé činidlo bola použitá 37% kyselina sírová a spotrebovalo sa jej 4,8 l. [36]

Po ukončení prevádzky membránového zariadenia pre úpravu povrchovej vody, bolo zariadenie na jeden týždeň v období 04.09 až 12.09.2018 z experimentálnych dôvodov prepojené na podzemný zdroj vody. Predmetom bolo sledovanie účinnosti separácie železa zo surovej vody, v ktorej bola jeho koncentrácia cca 3 mg/l . Bolo zabezpečené provízorne prevzdušnenie rozstrekom pomocou koša, cez ktorý bola voda napúšťaná do nádrže. Týmto prevzdušením došlo k oxidácii približne 75% železa. Takto upravená voda bola privádzaná do modulu. Koagulant PAX 19 bol zamenený za 12% chlórnan sodný. Po flokulácii a separácii na membráne bola celková účinnosť odstránenia železa 98%. Počas tohto testovacieho týždňa bolo vyprodukovaných 315 m^3 pitnej vody, z ktorých 0,59% bolo použitých na pranie, pričom filtračné cykly dosahovali dobu 10 – 20 hodín. [36]

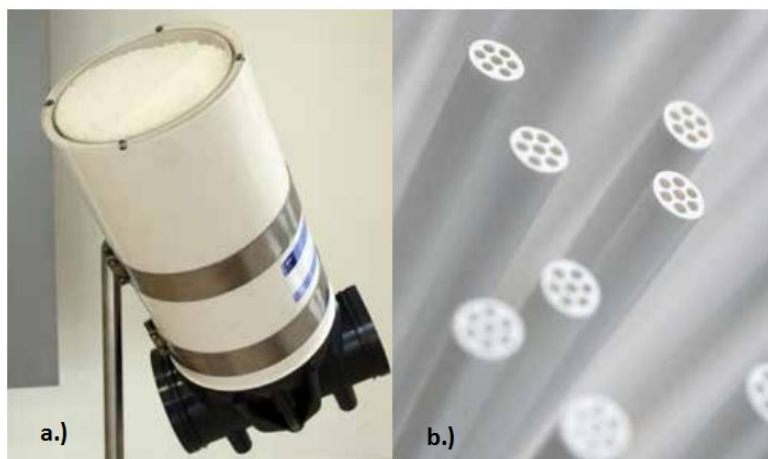
Využitie membránového procesu v rámci mobilnej úpravne vody sa v tomto prípade preukázalo ako vhodné riešenie. Inštalácia prebehla rýchlo, prevádzka bola bezproblémová a kvalita vody spĺňala požadované hodnoty. Na základe spokojnosti mesta aj prevádzkovateľa bolo toto riešenie využité v letných sezónach aj v nasledujúcich rokoch. [36]

4.3 ÚV SVOBODKA

Úpravňa vody Svobodka zásobuje pitnou vodou približne 23 tisíc obyvateľov v 14-tich obciach, skupinovým vodovodom Tachov-Bor-Planá. Zdrojom pre úpravňu vody je priehradná nádrž Lučina v Českom lese v okrese Tachov. Tento povrchový zdroj je postihnutý sezónnym zhoršením kvality vody kvôli rozmnoženiu siníc a rias počas teplých mesiacov. Aj z tohto

dôvodu sa prevádzkovateľ - Vodárny a kanalizace Karlovy Vary a.s. (Vodakva), rozhodol nainštalovať ultrafiltračné zariadenie. Tento prevádzkovateľ už má skúsenosti s ultrafiltračnými technológiami. Práve Vodárny a kanalizace Karlovy Vary a.s. realizovali vyššie spomínaný projekt prvého rozsiahleho použitia membrán pre úpravu vody v Českej republike na ÚV Březová, kde je membránový proces v prevádzke od roku 2016. Následne inštalovali ultrafiltračné zariadenie na ÚV Nová Ves v roku 2017. Takže ÚV Svobodka je tretím projektom tohto prevádzkovateľa, využívajúci membránovú technológiu, konkrétne ultrafiltráciu. Príprava inštalácie prebiehala od roku 2017 a v novembri 2020 bolo zariadenie spustené do skúšobnej prevádzky. [37]

Na úpravni je využívaných 48 ultrafiltračných modulov, ktoré sú rozdelené do štyroch blokov, po 12 kusov. Dokopy majú kapacitu $234 \text{ m}^3/\text{h}$ (65 l/s). Jeden modul (Obr. 4.2.a) tvorí valec dlhý 2,1 m, s priemerom 25 cm. Ide o modul z dutých vlákien s kapilármi. V module je umiestnených 2 600 plastových vlákien (Obr. 4.2.b) s priemerom 4 mm a v každom vlákne je 7 kapilár o priemere 0,9 mm. Plastová membrána má póry o veľkosti 20 nm. Celková plocha membrány jedného modulu je 80 m^2 . [37]



Obr. 4.2 a.) Rez ultrafiltračným modulom, b.) Plastové vlákna s kapilármi [37]

Ultrafiltrácia prebieha priamo (dead-end) a je preto potrebné pravidelné spätné preplachovanie. Spätné pranie prebieha približne raz za hodinu. Ultrafiltrovaná voda, použitá na pranie membrány je následne odvedená do vodojemu pracej vody a ďalej sa využíva na pranie pieskových filtrov na úpravni. Chemické čistenie prebieha v intervale jeden až tri dni. Ako činidlá sú použité kyselina sírová a hydroxid sodný. Približne raz mesačne je celý systém vydezinfikovaný oxidom chlórčitým. Na jednotke prebieha meranie prevádzkových parametrov (tlak, prietok, pH). Na ich základe je systém automaticky riadený. [37]

Využitie membrán na tejto úpravni poskytuje ďalšie cenné prevádzkové skúsenosti. Ide o trvalé využitie membránových modulov na úpravni o niekoľkonásobne vyššej kapacite ako v predchádzajúcich uvedených príkladoch. Ide o zariadenie, ktoré je vo funkcii relatívne krátku dobu a pre komplexnejšie vyhodnotenie prevádzky zatiaľ nie je dostupné dostatočné množstvo poznatkov.

5 ZÁSOBOVANIE PITNOU VODOU V OBCI PONIKY

5.1 ZÁKLADNÉ ÚDAJE O OBCI A KVALITE PITNEJ VODY

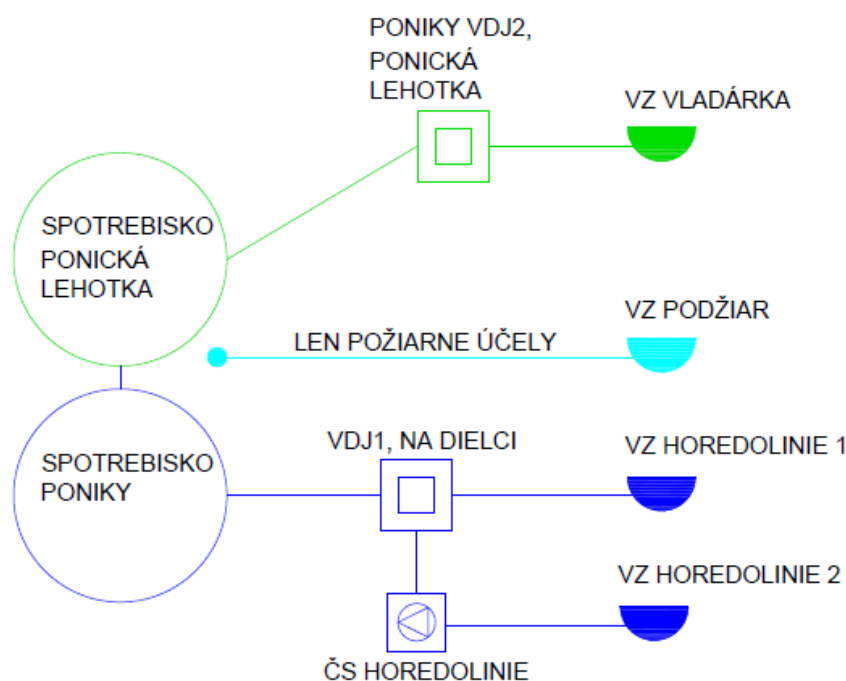
Obec Poniky, s počtom obyvateľov 1 570 (2016), sa nachádza na Strednom Slovensku, 12 km od krajského mesta Banská Bystrica. Leží v priemernej nadmorskej výške 502 m n. m.. Obec pozostáva z troch častí - Poniky, Ponická Lehôtka a Ponická Huta. [39]

Obec je zásobovaná pitnou vodou z prameňov nachádzajúcich sa v jej katastrálnom území. Táto voda je veľmi vysokej kvality a jediným procesom jej úpravy je hygienické zabezpečenie. Príležitostne sa však vyskytovali sťažnosti od obyvateľov obce na kvalitu vody, konkrétne na výrazné zvýšenie zákalu na rádovo 2-3 dni. Tento stav sa opakoval približne 3 až 4 krát do roka. Pri pravidelných odberoch, ktoré sú realizované dvakrát ročne, hodnoty zákalu spĺňali povolené limity. Pozorovaním tohto zhoršenia kvality pitnej vody sa preukázal jeho súvis s výskytom výrazných hydrologických javov ako privalové zrážky a jarné topenie snehu. Taktiež zvýšenie zákalu sa objavuje len v časti spotrebiska zásobovaného vodojemom VDJ1, Na dielci, do ktorého je voda privádzaná z dvoch prameňov. Tieto pramene boli prevádzkovateľom siete podrobené pozorovaniu a jeden z nich sa preukázal ako zdrojom tohto znečistenia. Pre upresnenie problému a možností jeho riešenia je v nasledujúcej kapitole priblížená vodovodná sústava, zásobujúca toto územie.

5.2 PONIKY - VODOVOD

Časť Ponická Huta má samostatný vodovod s vlastnými vodnými zdrojmi. Tento systém nie je postihnutý riešeným problémom, preto nie je potrebné ho bližšie popisovať. [40]

Časti Poniky a Ponická Lehôtka majú vybudovaný spoločný vodovod. Sú zásobované z vodných zdrojov Vladárka a Horedolinie. Nachádza sa tu aj vodný zdroj Podžiar, ktorý je v súčasnosti využívaný len na požiarné účely vzhľadom na hygienicky nevyhovujúcu kvalitu vody. Schéma tohto systému je zobrazená na Obr. 5.1.[40]



Obr. 5.1 Schéma vodovodu Poniky a Ponická Lehôtka

5.2.1 Spotřebisko Ponická Lehôtka

Táto časť obce je primárne zásobovaná z prameňa Vladárka. Voda je z neho privádzaná do vodojemu VDJ2, Ponická Lehôtka s objemom 60 m³. V prípade nedostatočnej výdatnosti tohto zdroja je možné otvorením uzávera na vodovodnej sieti, zásobovať Ponickú Lehôtku aj z vodojemu VDJ1, Na Dielci. [40]

5.2.2 Spotřebisko Poniky

Najväčšie spotřebisko obce, časť Poniky, je zásobené pitnou vodou z vodojemu VDJ1, Na Dielci o objeme 400 m³. Ako už bolo spomenuté, je možné v prípade potreby týmto vodojemom zásobovať aj časť spotřebiska Ponická Lehôtka. Do tohto vodojemu je voda privádzaná z dvoch prameňov. Primárnym zdrojom je prameň Horedolinie 1, ktorý do vodojemu priteká gravitačne. Ide o zdroj, ktorý je vo vlastníctve obce, na rozdiel od ostatných objektov systému, ktorých majiteľom je Stredoslovenská vodárenská spoločnosť, a.s. Výdatnosť tohto prameňa je po značnú časť roka dostatočná pre pokrytie potreby vody. Vyskytujú sa však obdobia kedy vplyvom sucha, výdatnosť prameňa klesne a je potrebné pristúpiť k využitiu ďalšieho zdroja, a to prameňa Horedolinie 2. Voda z neho je čerpaná do vodojemu cez Čerpaciu stanicu Horedolinie. [40]

Práve počas období, kedy je využívaný aj vodný zdroj Horedolinie 2, konkrétne po výskyte výdatných zrážok alebo pri topení snehu bolo pozorované zvýšenie zákalu vody u spotrebiteľov. Riešenie tohto problému je predmetom tejto práce a preto objekty, ktoré s ním súvisia budú bližšie popísané v ďalšej kapitole.

5.3 OBJEKTY PROBLÉMOVÉHO ÚSEKU

5.3.1 Prameň Horedolienie 2

Samotný prameň sa nachádza juhovýchodne od obce Poniky. Voda z neho je privádzaná do areálu ČS Horedolienie oceľovým potrubím DN300, dlhým 1180 m. Okresný úrad Banská Bystrica Odbor starostlivosti o životné prostredie určil povolený odber z tohto zdroja na 17,27 l/s. [40]

5.3.2 Areál ČS Horedolinie

V rámci oploteného areálu čerpacej stanice sa nachádza niekoľko objektov:

Pramenná záchytká (PZ)

Do pramennej záchytky je privádzaná voda z prameňa Horedolinie 2, oceľovým potrubím DN300. Je to podzemný objekt vnútorných rozmerov 5,0x2,9 m. Cez prepad je voda privádzaná do menšej mokrej časti rozmerov 1,0x2,5m, odkiaľ je odoberaná potrubím DN300. Z veľkej mokrej komory je odpadné potrubie DN300, ktoré pokračuje cez armatúrnú šachtu do prerušovacej komory. [40]

Armatúrna šachta (AŠ)

Ide o podzemný objekt vnútorných rozmerov 1,5x1,5m. Cez túto šachtu prechádza odpadné potrubie, na ktorom je osadený uzáver. [40]

Prerušovacia komora (PK)

Prerušovacia komora je podzemný objekt, skladajúci sa z troch komôr. Je vybudovaný z hrubého plechu a má vnútorné rozmery 1,8x2,9 m. Vstup do objektu je cez rúrový vstupný komín priemeru 1000 mm. Do PK je voda privádzaná z pramennej záchytky oceľovým potrubím DN300 a cez armatúrnu šachtu odpadným potrubím DN400. Vo vstupnej časti sú osadené dva uzávery na výpustnom a odbernom potrubí. Do tejto časti je privedené odpadné potrubie z armatúrnej šachty a odtiaľ odvádzané odpadným potrubím DN500 mimo objekt. [40]

Zberná komora (ZK)

Je to podzemný objekt, vnútorných rozmerov 2,7x4,65 m, skladajúci sa zo štyroch častí. Cez dve menšie komory rozmerov 0,7x1,1 m preteká voda privádzaná prírodným potrubím DN300 z prerušovacej komory do tretej, kde sú umiestnené dve sacie potrubia DN100 pre čerpadlá. V tejto časti je aj prelivné potrubie DN200. V poslednej časti sú osadené dva uzávery na výpustnom potrubí. [40]

Čerpacia stanica (ČS)

ČS Horedolinie (Obr. 5.2) je vodohospodársky objekt o rozmeroch 4,3x7,3 m, so svetlou výškou 2,3 m. Čerpacou stanicou sa prečerpáva voda z nádrže zbernej komory do vodojemu Poniky – VDJ1, Na Dielci, 1x400 m³. Pozostáva z prízemnej miestnosti (Obr. 5.2), v ktorej sú umiestnené armatúry, čerpadlá a elektrorozvádzač. V čerpacej stanici je zriadený diaľkový prenos dát. Technológia pozostáva z dvoch vertikálnych čerpadiel (na Obr. 5.2 je viditeľné len jedno z nich, v čase zaobstarania fotografie bolo druhé čerpadlo v servise), armatúr, potrubí, meracích a regulačných zariadení. Dve vertikálne čerpadlá pre dopravu vody sú osadené na betónových základoch. Ide o dve rovnaké čerpadlá Grundfos, typ CR32-7-2 A-F-A-E-HQQE (Q_{max} = 30 m³; H_{max} = 100,4 m. P = 15 kW). Každé čerpadlo má svoje sacie potrubie z pramennej komory DN100. Sú chránené proti chodu nasucho ponornými sondami v nádrži. Výtlačné potrubie do vodojemu je oceľové DN100. Je na ňom osadený vodoměr, tlakomer a kohútik pre možnosť odberu vzoriek. [40]

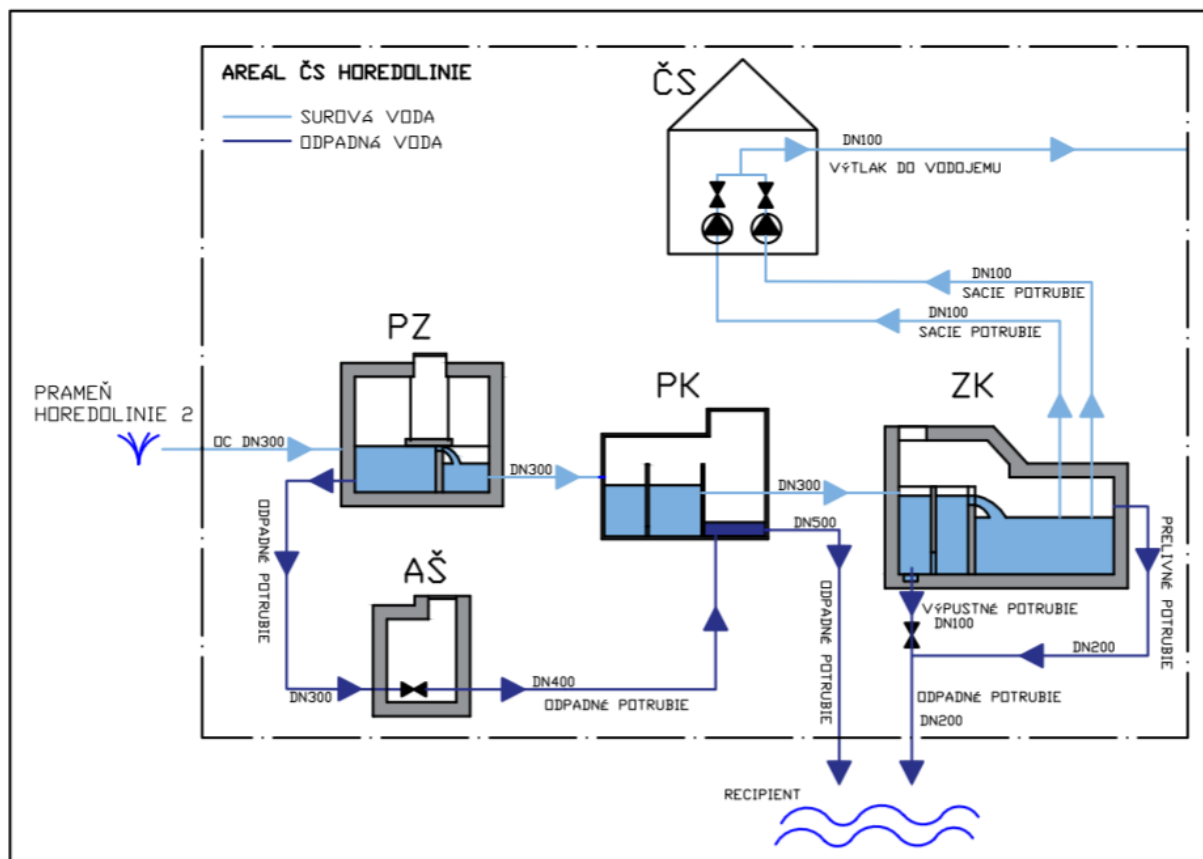


Obr. 5.2 Čerpacia stanica Horedolinie - exteriér



Obr. 5.3 Čerpacia stanica Horedolinie - interiér

Schéma areálu ČS:



Obr. 5.4 Schéma areálu ČS Horedolinie, PZ – pramenná záchytká, AŠ – armatúrna šachta, PK – prerušovacia komora, ZK – zberná komora, ČS – čerpacia stanica

5.3.3 Vodojem Poniky – VDJ1, Na Dielci

Vodojem o objeme 400 m³ slúži na akumuláciu vody a udržiavanie tlakovej čiary pre obec Poniky. Pozostáva z jednej nádrže mnohouholníkového pôdorysu s výškou hladiny 5,0 m a manipulačnej komory. Voda je privádzaná do vodojemu gravitačným potrubím z prameňa Horedolinie 1 a čerpacej stanice Horedolinie. Vodojem VDJ1 je v tejto kapitole uvedený z toho dôvodu, že v ňom prebieha zdravotné zabezpečenie pitnej vody, dávkovaním chlórnanu sodného do akumuláčnej nádrže. [40]

6 SEZÓNNE ZVÝŠENÝ ZÁKAL PRAMEŇA HOREDOLINIE 2

6.1 POŽIADAVKY NA HODNOTY ZÁKALU V PITNEJ VODE

Na území Slovenskej republiky sú požiadavky na kvalitu pitnej vody dané vyhláškou Ministerstva zdravotníctva č. 247/2017 Z. z. (v znení č. 97/2018 Z. z.). Tento legislatívny dokument určuje limit zákalu medznou hodnotou 5 FNU. [45]

V rámci Čerpacej stanice Horedolinie, po výdatných dažďoch hodnoty zákalu niekoľkokrát ročne presiahnu aj hodnotu 100 FNU.

6.2 PÔVODNÝ STAV

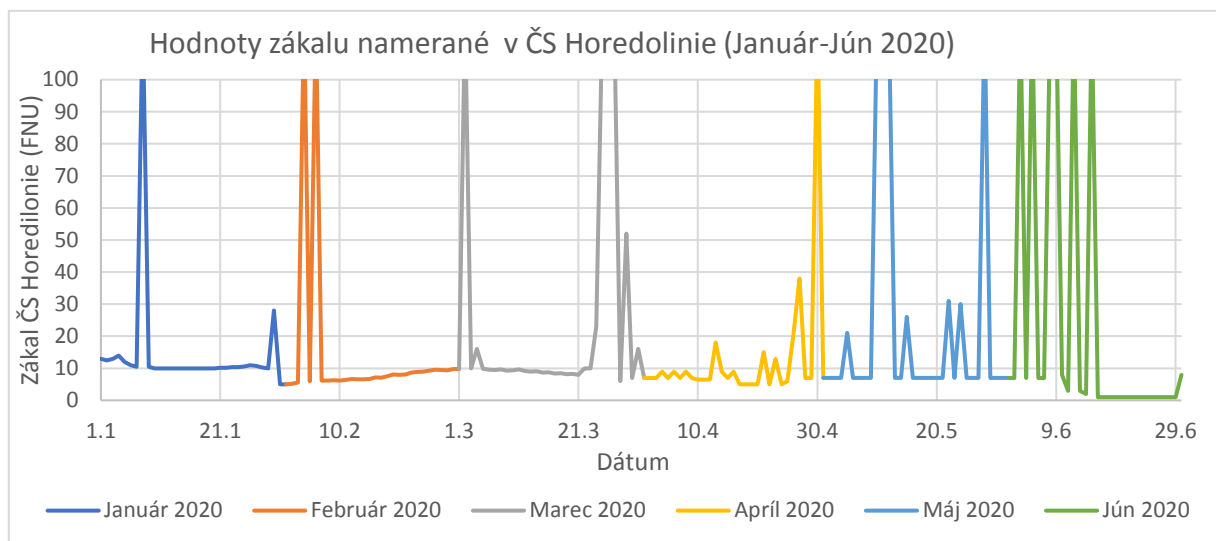
V súčasnosti je spomínaný problém riešený z dlhodobého hľadiska neefektívnym spôsobom. V ČS Horedolinie je osadené zariadenie na meranie zákalu - zákalomer ULTRATURB SC100 od firmy Lange (Obr. 6.1). Zariadenie sa skladá zo senzora a vyhodnocovacej jednotky. Celá zostava je upevnená na stene čerpacej stanice. Senzor je napájaný z výtlačky cez redukčný ventil. Toto zariadenie poskytuje kontinuálne záznamy o zákale v rozsahu 0-100 FNU.[40]



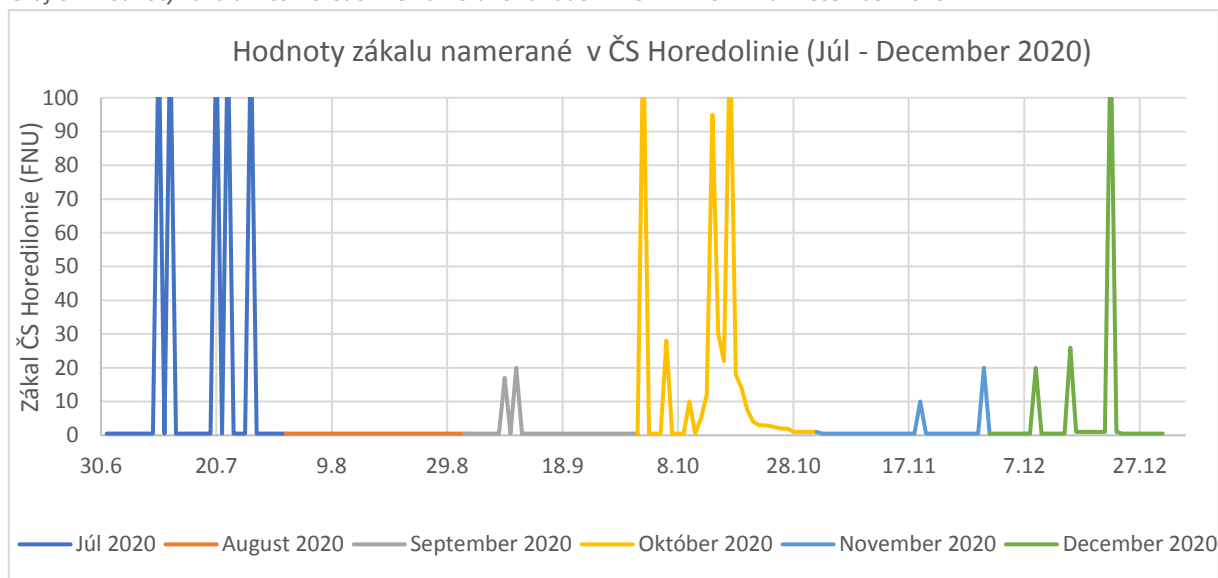
Obr. 6.1 Zákalomer ULTRATURB

V prípade prekročenia medznej hodnoty 5 FNU, zákalomer odošle na stredisko upozornenie o nevyhovujúcej kvalite vody. V tomto prípade prevádzkovateľ diaľkovo odstaví dodávku vody z čerpacej stanice do vodojemu po dobu, kým kvalita vody nespĺňa požadované hodnoty. Počas reálnej prevádzky sa však postupuje podľa skúseností prevádzkovateľa a čerpanie do vodojemu sa odstaví ešte pred dosiahnutím hraničnej hodnoty 5 FNU. Na grafe 6.1, 6.2 a 6.3 sú uvedené hodnoty zákalu namerané zákalomerom v období od januára 2020 do 12. marca 2021. V grafoch sú viditeľné výrazné výkyvy v kvalite vody.

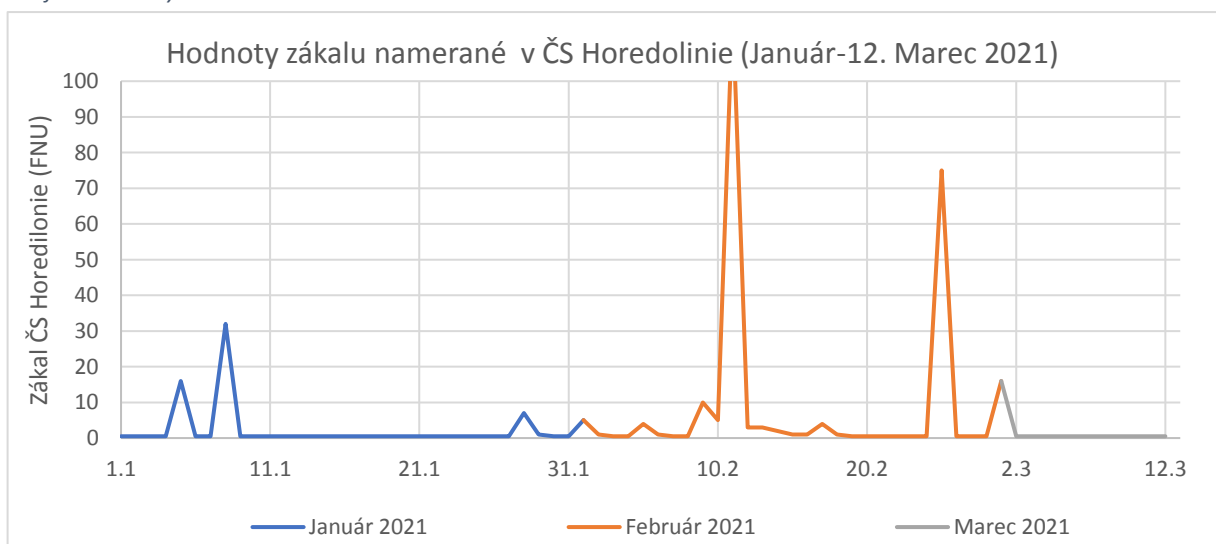
Graf 6.1 Hodnoty zákalu v ČS Horedolinie namerané zariadením ULTRATURB Január-Jún 2020



Graf 6.2 Hodnoty zákalu v ČS Horedolinie namerané zariadením ULTRATURB Júl-December 2020



Graf 6.3 Hodnoty zákalu v ČS Horedolinie namerané zariadením ULTRATURB Január-12. Marec 2021



Z uvedených grafů vyplývá, že v roce 2020 došlo k rapidnímu zhoršení hodnot zákalu 22 krát, když byla překročena hodnota 100 FNU. V případě krátkodobého zhoršení kvality vody nenastává zásadní problém, protože po většinu roka nie je ani potrebné tento zdroj využiť, ak primárny zdroj pre vodojem (prameň Horedolinie 1) má dostatočnú výdatnosť. Avšak okrem krátkodobých výrazných výkyvov bol zákal v jarnom období dlhodobo nad povolenými hodnotami a od januára do mája 2020 nebolo prakticky možné zdroj Horedolinie 2 vôbec využívať. V prípade, žeby výdatnosť prameňa Horedolinie 1 v tomto období výraznejšie klesla, spotrebisko Poniky by mohol postihnúť závažný nedostatok pitnej vody. Prevádzkovateľ teda pristúpil k hľadaniu nového riešenia, ktoré by zaručilo predídenie takejto situácie.

6.3 NOVÉ RIEŠENIE

Ako nové riešenie bolo navrhnuté využitie membránovej technológie a jej zaradenie do stávajúceho procesu úpravy pitnej vody. Konkrétne inštaláciou membránovej jednotky do stávajúcej ČS Horedolinie. Hlavným dôvodom tejto voľby je priestorovo a časovo nenáročná inštalácia a možnosť otestovania účinnosti tohto zariadenia pre daný problém bez výrazných stavebných zásahov.

V predchádzajúcich kapitolách bolo spomenuté, že v Českej republike nie sú technológie využívajúce membránové procesy veľmi rozšírené. V rámci Slovenskej republiky je ich však ešte menej. Nebolo teda možné pri výbere vhodného zariadenia vychádzať zo skúseností prevádzkovateľa a ani referencií z podobných projektov. Z tohto dôvodu bola inštalácia membránovej jednotky na Čerpacej stanici Horedolinie na Ponikoch dočasne realizovaná skôr s experimentálnym zámerom. Pre tieto účely poskytla vlastníkovi siete inštalované zariadenie Stavebná fakulta Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, na dobu potrebnú pre otestovanie vhodnosti tohto riešenia. Zapožičaným zariadením je ultrafiltračný modul UA-640 Microdyn Nadir. Voľba konkrétneho modulu teda nebola podrobená hlbšiemu výberovému procesu. K tomu sa pristúpi až po vyhodnotení prvých výsledkov z úvodných testov.

6.3.1 Ultrafiltračný modul UA-640 Microdyn Nadir

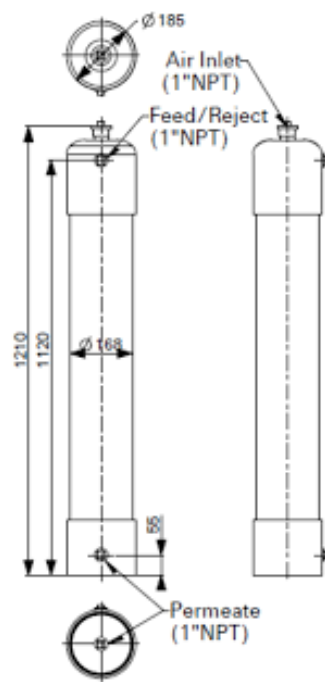
Základné parametre

Ide o plne automatizovaný membránový modul, s riadiacim systémom, meraním transmembránového tlaku, spätným preplachom membrány vodou a vzduchom, s možnosťou chemického prania. Modul obsahuje polyakrylonitrilovú (PAN) membránu z dutých vlákien s veľkosťou pórov 0,025 μm , usporiadaných v tvare U. Pracuje pri veľmi nízkom napájacom tlaku, vďaka hydrofilnej vlastnosti PAN membrány, čo vedie k úsporám energie. Zariadenie je zobrazené na Obr. 6.2. [41]

Typ filtrácie je priamy (dead-end). Vlákna membrány majú vonkajší priemer 2,1 mm a vnútorný 1,1 mm. Plocha membrány je 16 m^2 . Maximálny transmembránový tlak je 2 bary. Rozsah možného prietoku sa pohybuje v hodnotách 0,1-1,3 m^3/h . Pre správnu funkciu je potrebné pH 2-10 a teplota 5-45°C. Čo sa týka rozmerov, priemer zariadenia je 168 mm a v rozšírenej časti 185 mm, celé zariadenie je dlhé 1 210 mm (Obr. 6.3). [41]



Obr. 6.2 Ultrafiltračný modul UA-640 Microdyn Nadir



Obr. 6.3 Rozmery ultrafiltračného zariadenia UA-640 [3]

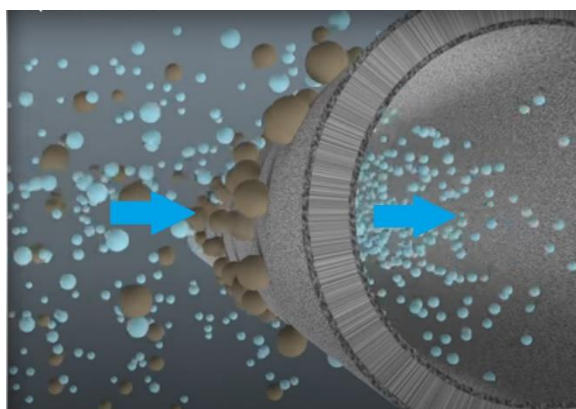
V hornej časti modulu sa nachádzajú dva otvory. Jeden slúži ako prívod surovej vody, do ktorej je možnosť vháňať vzduch pri praní a druhý odvádza odpadnú vodu po praní. V spodnej časti modulu sa nachádza otvor pre odvod filtrátu, zároveň je týmto otvorom v režime prania opačným smerom privádzaná prefiltrovaná voda, ktorá v tom prípade slúži ako pracia.

Filtrácia

Pri filtrácii surová voda najprv prechádza filtrom pre zachytenie hrubých nečistôt (Obr. 6.4) a potom je privádzaná do samotného modulu, prívodom v jeho hornej časti. Tam prúdi medzerami medzi vláknami, uloženými v tvare U a postupne prestupuje membránou do vnútornej dutej časti vlákien. Ide teda o prúdenie v režime „outside-in flow“. Pevné látky a baktérie membránou nepreniknú a usádzajú sa na povrchu vlákien (Obr. 6.5). Prefiltrovaná voda odteká dutinami a potom odtokom v dolnej časti zariadenia. [41]



Obr. 6.4 Filter pre zachytenie hrubých nečistôt



Obr. 6.5 Usádzanie pevných látok na povrchu membrány [3]

Regenerácia

Mechanická regenerácia je možná všetkými tromi spôsobmi, ktoré už boli bližšie opísané v rešeršnej časti práce. V rámci tohto zariadenia konkrétne prebiehajú nasledovne:

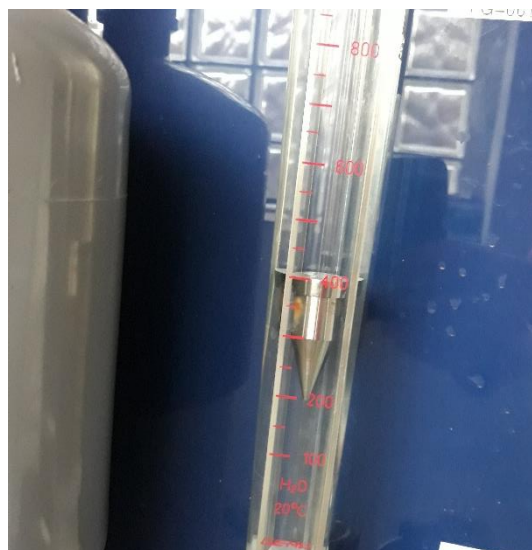
- Vzduchom („Air flush“) – otvorom v hornej časti je privádzaný okrem vody aj vzduch pre zvýšenie turbulencií a uvoľnenie nečistôt. Vzduch so znečistenou vodou je odvádzaný odpadným otvorom v hornej časti zariadenia. [43]
- Vodou, v smere filtrácie („Forward flush“) – surová voda je privádzaná zvýšeným prietokom vstupom v hornej rozšírenej časti a opúšťa modul vývodom pre odpadnú vodu. [43]
- Vodou, proti smeru filtrácie („Backward flush“) – voda je privedená otvorom určeným pre odtok filtrátu a prúdi v opačnom smere, zvnútra dutín vlákien, pričom vyplachuje usadené látky v póroch membrány a odteká otvorom vo vrchnej časti zariadenia, určeným pre odpadnú vodu. [43]

Riadiaci systém a monitoring

Zariadenie je vybavené riadiacim panelom (Obr. 6.6), pomocou ktorého je možné zvoliť niekoľko spôsobov ovládania procesu ultrafiltrácie. Je možné nastaviť automatický režim, ktorý funguje na monitorovaní poklesu transmembránového tlaku. Pri jeho poklese na určenú hodnotu, zariadenie automaticky spustí proces prania membrány. Dostupná je taktiež možnosť manuálneho riadenia. V tomto prípade sa ručne nastaví požadovaná doba filtrácie a trvanie prania. Pomocou panelu je taktiež možné zvoliť požadovaný spôsob regenerácie membrány a dávkovanie pracieho činidla. Čerpadlo, ktoré zabezpečuje dopravu surovej vody do zariadenia a čerpadlo, ktoré čerpá filtrát v režime prania, sú zapojené do tohto riadiaceho panelu, čo umožňuje automatické zapínanie a vypínanie čerpadiel podľa potreby zvoleného spôsobu ovládania. Požadovanú hodnotu produkcie vody je možné ručne nastaviť otáčaním kolieska na zariadení, pričom aktuálnu hodnotu prietoku je zobrazená polohou plávajúcu na rotametre (Obr. 6.7). Rozsah jeho stupnice je 100-1 300 l/h.



Obr. 6.6 Riadiaci panel ultrafiltračného zariadenia



Obr. 6.7 Rotameter

Tlak je sledovaný na niekoľkých miestach v rámci zariadenia. Analógové meranie tlaku (Obr. 6.8) je umiestnené na vstupe surovej vody do zariadenia a na privode vzduchu, v prípade prania vzduchom. Digitálne meranie tlaku (Obr. 6.9) je osadené pre meranie transmembránového tlaku v module a na potrubí odvádzajúcom odpadnú vodu.



Obr. 6.8 Analogové meranie tlaku na zariadení



Obr. 6.9 Digitálne meranie tlaku na zariadení

6.4 PREDBEŽNÉ VYHODNOTENIE VOĽBY ZARIADENIA

Ako už bolo spomenuté, podrobnejší proces výberu vhodného zariadenia, ktoré bude finálne umiestnené v Čerpacej stanici Horedolinie, prebehne až po úvodnom testovaní. Pred tým je však potrebné spracovať predbežné posúdenie aplikovateľnosti ultrafiltračného membránového modulu na daný problém. V tejto kapitole budú uvedené základné požiadavky a zlučiteľnosť zariadenia s miestnymi podmienkami čerpacej stanice.

Cieľom úpravy je odstránenie zákalu na vodnom zdroji. Keďže ide o zákal sezónny, vyskytujúci sa po výdatných zrážkach, je možné predpokladať, že ho spôsobujú splavené častice pôdy. Tie sa podľa veľkosti môžu deliť rôznymi systémami. Pomocou medzinárodného systému (ISSS) sú to piesok (0,02-2 mm), prach (0,002-0,02 mm) a íl (<0,002 mm). [44]

Pre presnejšie určenie by bolo potrebné spraviť podrobný rozbor zákalu na zdroji Horedolinie 2, aby bolo možné určiť konkrétne veľkosť častíc spôsobujúcich zákal. Zariadenie Microdyn Nadir UA-640 je vybavené membránou s veľkosťou pórov 0,025 μm , čo pokrýva zásadnú väčšinu škály možných častíc (piesok 100%, prach 100%, íl 99%) a teda predpoklad je, že ultrafiltračné zariadenie by malo byť úspešné pri dosiahnutí požadovaného cieľa.

Zariadenie pre svoju funkciu vyžaduje rozsah hodnôt pH 2-10. Na vodnom zdroji Horedolinie 2 bola v sledovanom období v rokoch 2008-2020 nameraná najnižšia hodnota pH 6,06 a najvyššia 7,61. Tolerancia membrány voči pH je teda zlučiteľná s hodnotami surovej vody. Požadovaná teplota vody sa pohybuje v rozmedzí 5-45°C. Teplota vody v prameni počas jej sledovania bola v rozsahu 6,2-10,5°C, čo teda taktiež spĺňa požadované hodnoty.

Voda v rámci čerpacej stanice neprechádza žiadnou predúpravou, teda nehrozí poškodenie membrány pridanými chemikáliami.

Na základe týchto úvodných posúdení sa zariadenie Microdyn Nadir UA-640 javí ako vhodné pre použitie na Čerpacej stanici Horedolinie. Nie sú prítomné okolnosti, ktoré by ohrozovali jeho funkčnosť. Bude však potrebné sledovať aj jeho výhodnosť, čo sa týka miery účinnosti odstránenia zákalu, množstva potrebnej práce vody, spotreby činidiel pre regeneráciu a energetickej výhodnosti. Taktiež je potrebné sledovať vplyv prerušovanej prevádzky čerpacej stanice na zariadenie.

6.5 TESTOVANIE ULTRAFILTRAČNEJ JEDNOTKY NA ČS HOREDOLINIE

6.5.1 Zapojenie ultrafiltračného modulu

V polovici marca 2021 bolo zariadenie Microdyn Nadir UA-640 dopravené na Čerpaciu stanicu Horedolinie a zapojené tak, aby bolo možné spustiť jeho testovanie priamo na miestnych podmienkach. Je potrebné brať do úvahy, že ide len o dočasné provizórne zapojenie, ktoré bude pred uvedením do funkčnej prevádzky realizované iným spôsobom, podľa požadovaných noriem. Zapojenie zariadenia do systému ČS bolo nasledovné:

Zariadenie s membránovým modulom bolo umiestnené v interiéri čerpacej stanice. Ponorné čerpadlo AL-KO DIVE 5500-3 ($H_{\max} = 30$ m, $Q_{\max} = 5,5$ m³/h, $P = 800$ W) bolo spustené do zbernej komory v areáli, a jeho výtláčne potrubie (dočasne pozostávajúce z PVC hadice s polyesterovým krížovým pletením, 32x7 mm) bolo napojené do ultrafiltračného zariadenia. Ďalšie potrubie, rovnakého materiálu a dimenzie bolo použité ako odpadné potrubie pre praciu vodu. Keďže počas úvodných testov nebolo do práce vody pridávané žiadne činidlo, odpadné potrubie bolo možné zaústiť priamo do recipientu. Voda prefiltrovaná membránou bola ďalšou PVC hadicou odvádzaná do plastovej nádrže o veľkosti 0,5 m³, vybavenej prelivným potrubím, ktorým bola odvádzaná taktiež do recipientu. Filtrát teda nebol vpúšťaný do vodojemu a do siete, keďže ide dočasne len o experimentálne zapojenie. Druhé ponorné čerpadlo AL-KO DIVE 5500-3 bolo umiestnené v spomínanej plastovej nádrži pre prefiltrovanú vodu a slúžilo na čerpanie filtrátu pre účel spätného prania. Umiestnenie zariadenia a plastovej nádrže v interiéri čerpacej stanice je viditeľné na Obr. 6.10.



Obr. 6.10 Ultrafiltračné zariadenie a nádrž na filtrát v interiéri ČS

Pre vyhodnotenie účinnosti odstránenia zákalu zo surovej vody je potrebné pravidelné odoberanie vzoriek vody pred jej vstupom do membránového modulu a na výstupe z neho. Odober vzoriek surovej vody bol realizovaný priamo na zariadení, kde je práve pre tento účel osadený kohútik (Obr. 6.11). Vzorky filtrátu bolo možné odoberať na výstupe z hadice do plastovej nádrže (Obr. 6.12). V prípade potreby je možný odber vzoriek aj pracovnej vody na vyústení odpadnej hadice do recipientu.

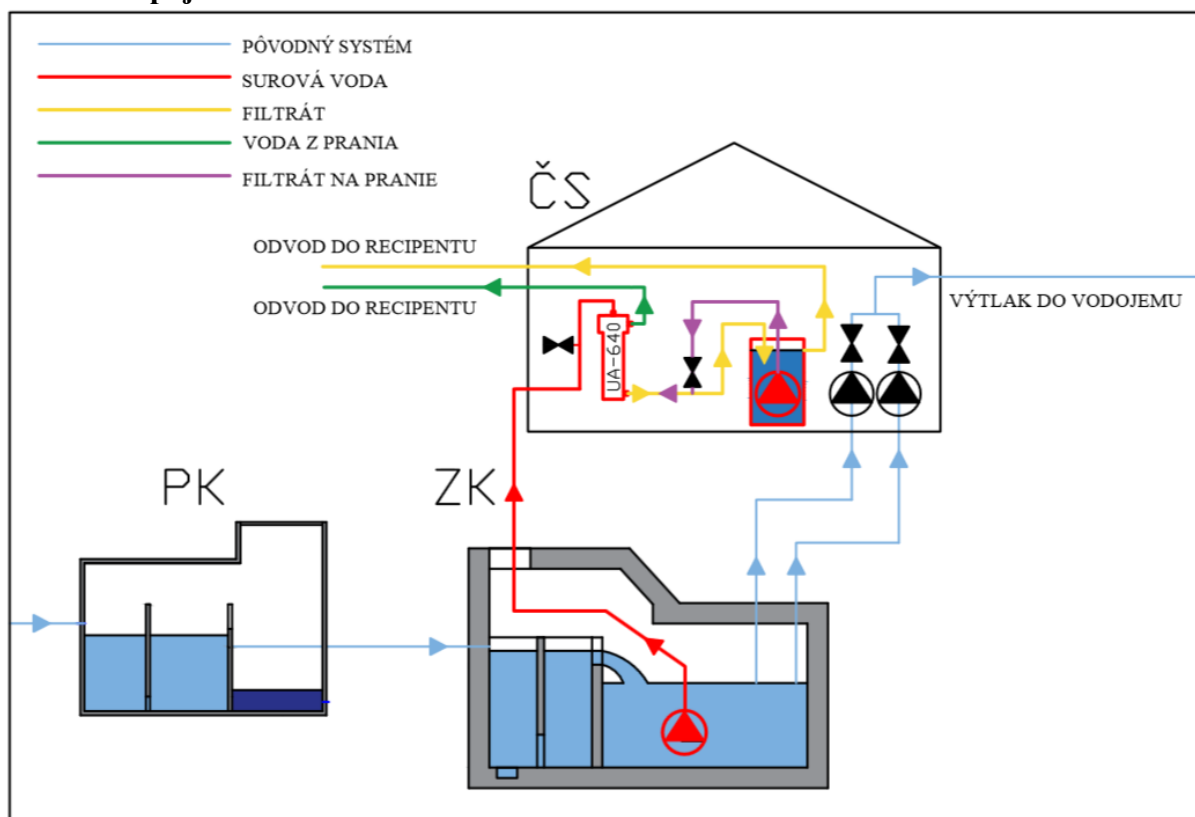


Obr. 6.11 Odober vzorky surovej vody



Obr. 6.12 Odober vzorky filtrátu

Schéma zapojenia zariadenia v rámci ČS Horedolinie:



Obr. 6.13 Schéma zapojenia membránového zariadenia v ČS Horedolinie, PK – prerušovacia komora, ZK – zberná komora, ČS – čerpacia stanica

6.5.2 Zahájenie testovania

Zariadenie bolo zapojené a pripravené na testy v polovici marca 2021. Hodnoty zákalu na prameni Horedolinie 2 sa v tomto období pohybovali dlhodobo na nízkych hodnotách. Prvotným zámerom prevádzkovateľa bolo skúšky ultrafiltračného modulu odložiť do doby, kým sa zákal na prameni nezvýši, aby bolo možné zariadenie odskúšať za podmienok, v akých je predpokladaná jeho prevádzka v budúcnosti. Niekoľko týždňov od zapojenia zariadenia sa v oblasti nevyskytovali zrážky a zákal zdroja sa udržiaval v povolených hodnotách, pri ktorých by bolo možné vodu čerpať do vodojemu bez dodatočnej úpravy, aj keď v spomínanom období čerpanie do vodojemu neprebiehало z dôvodu dostatočnej výdatnosti zdroja Horedolinie 1. Aj napriek stále vyhovujúcej kvalite vody, bolo 5. apríla 2021 pristúpené k prvému spusteniu zariadenia Microdyn Nadir UA-640 pre experimentálne účely na Čerpacej stanici Horedolinie.

Príprava pred spustením membránového modulu

Pred samotným spustením zariadenia bola prevedená obhliadka areálu a kontrola správneho zapojenia všetkých potrubí. Boli odmerané základné fyzikálne ukazovatele vody. Teplota vody v zbernej komore bola 6,9°C a pH malo hodnotu 7,2. Prevádzkovateľ sa rozhodol pre manuálne nastavenie filtračného a pracieho cyklu. Dĺžka filtrácie bola nastavená na dobu trvania 20 minút, po ktorej bolo zvolené mechanické pranie spätným preplachom, po dobu 2 minút. Ako už bolo spomenuté, počas tohto testovania neboli použité žiadne pracie činidlá. Ich druh a dávkovanie bude určené prevádzkovateľom po dlhšom sledovaní zanášania membrány.

Zariadenie použité na meranie

Pre vyhodnotenie zákalu odobratých vzoriek bol použitý prenosný zákalomer Hach 2100Q (Obr. 6.14). Do prístroja sa vloží vzorka v ampulke o objeme 15 ml (Obr. 6.15) a do niekoľkých sekúnd sa na displeji zobrazí hodnota zákalu. Toto zariadenie dokáže určiť zákal v rozsahu 0-1000 NTU (Nephelometric Turbidity Units), s presnosťou na 0,01 NTU a odchýlkou 2%. [8] NTU sú jednotky, ktoré sú používané pri metódach Agentúry pre ochranu životného prostredia (EPA), v Spojených štátoch amerických. V európskych krajinách sa častejšie používajú jednotky FNU (Formazin Nephelometric Units), v ktorých sú uvedené aj limity v slovenskej legislatíve. Ich hodnoty sú však zameniteľné a je možné používať vzťah $1 \text{ NTU} = 1 \text{ FNU}$. [47] Ďalej v texte budú používané len jednotky FNU.



Obr. 6.14 Zákalomer Hach 2100Q



Obr. 6.15 Ampulky na vzorky 15 ml

Spustenie ultrafiltračného modulu a priebeh merania

Po spustení ultrafiltračného modulu prebehli 3 filtračné cykly, počas ktorých neprebiehala meranie. Modul nebol niekoľko mesiacov v prevádzke, takže sa v ňom nenachádzala voda a bolo potrebné ho najprv úplne zatopiť a odstrániť z neho všetok vzduch. Taktiež prebiehalo ustálenie transmembránového tlaku. Tieto 3 prvé cykly boli označené ako nulté a nie sú súčasťou číslovania sledovaných cyklov.

Následne bolo sledovaných 25 filtračných cyklov. Celé meranie bolo realizované v rámci jedného dňa a trvalo približne 9,2 hodiny. Odber vzoriek prebiehal z odberných miest pre surovú vodu a pre filtrát. Tieto vzorky boli vložené do zákalomeru Hach 2100Q a pomocou neho boli získané hodnoty zákalu surovej vody pred membránou a hodnoty zákalu vody po jej prechode membránou.

Počas jedného 20-minútového cyklu boli vzorky odobraté 5krát, a to bezprostne po spustení cyklu ($t = 0$ min), po 5 minútach ($t = 5$ min), po 10 minútach ($t = 10$ min), po 15 minútach ($t = 15$ min) a keďže po 20 minútach sa spustilo pranie, posledné meranie v rámci cyklu bolo realizované v 19-tej minúte ($t = 19$ min). Pri každom odbere bola zároveň zaznamenaná aktuálna hodnota transmembránového tlaku.

V priebehu merania boli sledované filtračné cykly pri rôznych hodnotách prietoku (Q). Ako prvá hodnota bol nastavený najnižší možný prietok 100 l/h ($0,1 \text{ m}^3/\text{h}$) a pri tejto hodnote boli sledované prvé 3 cykly (cyklus 1-3). Následne bol prietok zvyšovaný na 200 l/h ($0,2 \text{ m}^3/\text{h}$), 300 l/h ($0,3 \text{ m}^3/\text{h}$) a 400 l/h ($0,4 \text{ m}^3/\text{h}$). Pri každej hodnote prietoku prebiehalo meranie po dobu 3 cyklov. Potom bol prietok znovu nastavený na 100 l/h a celý proces sa zopakoval. Teda celkovo pre každý sledovaný prietok bolo meranie realizované počas 6 cyklov. Na záver bol meraný jeden doplnkový cyklus pri prietoku 600 l/h ($0,6 \text{ m}^3/\text{h}$).

Všetky hodnoty zaznamenané počas merania sú uvedené v Tab. 6.1. Zároveň je táto tabuľka doplnená o dopyčítané hodnoty účinnosti odstránenia zákalu pre každé meranie, ktoré boli určené pomocou vzťahu:

$$\text{Účinnosť odstránenia zákalu} = \frac{\text{zákal filtrátu}}{\text{zákal surovej vody}} * 100 \text{ [\%]} \quad /6.5.2.1/$$

Tab. 6.1 Namerané hodnoty zákalu surovej vody a filtrátu

CYKLUS		čas od začiatku cyklu t [min]																								
		0					5					10					15					19				
		TMP	zákal sur. voda	zákal filtrát	účinnosť		TMP	zákal sur. voda	zákal filtrát	účinnosť		TMP	zákal sur. voda	zákal filtrát	účinnosť		TMP	zákal sur. voda	zákal filtrát	účinnosť		TMP	zákal sur. voda	zákal filtrát	účinnosť	
[-]	[l/h]	[bar]	[FNU]	[FNU]	[%]	[bar]	[FNU]	[FNU]	[FNU]	[%]	[bar]	[FNU]	[FNU]	[FNU]	[%]	[bar]	[FNU]	[FNU]	[FNU]	[%]	[bar]	[FNU]	[FNU]	[FNU]	[%]	
1		0,44	4,27	1,55	63,7		0,45	4,77	2,75	42,3		0,44	4,96	0,50	89,9		0,44	2,37	0,30	87,3		0,44	2,78	0,21	92,4	
2	100	0,43	3,16	1,45	54,1		0,46	6,26	3,61	42,3		0,46	4,26	0,61	85,7		0,46	3,04	0,34	88,8		0,46	1,53	0,30	80,4	
3		0,46	2,17	1,02	53,0		0,45	2,14	1,26	41,1		0,45	2,13	0,69	67,6		0,45	2,07	0,55	73,4		0,45	2,14	0,37	82,7	
4		0,56	2,50	1,70	32,0		0,57	4,17	1,90	54,4		0,65	3,62	0,36	90,1		0,64	1,89	0,26	86,2		0,63	2,44	0,32	86,9	
5	200	0,64	2,89	1,22	57,8		0,63	3,02	1,13	62,6		0,63	2,44	0,27	88,9		0,63	1,28	0,35	72,7		0,63	2,04	0,26	87,3	
6		0,59	2,47	1,16	53,0		0,55	2,18	1,05	51,8		0,59	2,77	0,26	90,6		0,61	2,20	0,40	81,8		0,55	1,70	0,38	77,6	
7		0,75	1,75	0,83	52,6		0,76	1,80	0,35	80,6		0,76	1,88	0,28	85,1		0,76	2,73	0,30	89,0		0,76	2,37	0,29	87,8	
8	300	0,75	1,87	1,12	40,1		0,73	2,80	0,37	86,8		0,70	2,29	0,25	89,1		0,70	1,48	0,24	83,8		0,70	1,60	0,25	84,4	
9		0,71	1,58	0,58	63,3		0,72	1,39	0,31	77,7		0,72	1,64	0,35	78,7		0,71	1,45	0,21	85,5		0,71	2,37	0,27	88,6	
10		0,80	1,35	0,58	57,0		0,80	1,71	0,22	87,1		0,85	1,71	0,25	85,4		0,84	2,16	0,24	88,9		0,84	1,90	0,26	86,3	
11	400	0,80	1,47	0,46	68,7		0,79	1,31	0,28	78,6		0,85	1,40	0,36	74,3		0,84	1,54	0,33	78,6		0,84	2,96	0,24	91,9	
12		0,78	1,54	0,41	73,4		0,79	3,14	0,30	90,4		0,82	1,43	0,25	82,5		0,82	2,09	0,27	87,1		0,81	1,84	0,25	86,4	
13		0,27	1,51	0,35	76,8		0,32	1,38	0,34	75,4		0,32	1,78	0,26	85,4		0,35	1,55	0,37	76,1		0,34	1,86	0,58	68,8	
14	100	0,35	1,71	0,40	76,6		0,36	2,12	0,35	83,5		0,36	2,05	0,35	82,9		0,36	1,86	0,30	83,9		0,36	1,68	0,20	88,1	
15		0,32	1,84	0,31	83,2		0,35	1,51	0,27	82,1		0,35	1,42	0,26	81,7		0,36	1,57	0,25	84,1		0,36	1,69	0,24	85,8	
16		0,54	1,87	0,33	82,4		0,55	1,79	0,24	86,6		0,55	2,63	0,24	90,9		0,54	2,35	0,24	89,8		0,54	1,97	0,27	86,3	
17	200	0,55	2,01	0,30	85,1		0,55	2,29	0,31	86,5		0,54	1,98	0,21	89,4		0,54	1,80	0,22	87,8		0,55	1,54	0,28	81,8	
18		0,49	1,37	0,28	79,6		0,50	1,49	0,20	86,6		0,50	1,76	0,23	86,9		0,54	1,73	0,26	85,0		0,54	1,38	0,20	85,5	
19		0,69	1,72	0,31	82,0		0,70	2,45	0,23	90,6		0,70	2,22	0,22	90,1		0,70	1,91	0,25	86,9		0,70	1,54	0,19	87,7	
20	300	0,68	1,84	0,30	83,7		0,68	2,26	0,29	87,2		0,68	2,20	0,34	84,5		0,68	1,63	0,24	85,3		0,68	1,71	0,27	84,2	
21		0,68	1,69	0,29	82,8		0,68	2,14	0,26	87,9		0,68	2,13	0,23	89,2		0,67	1,56	0,22	85,9		0,67	1,57	0,24	84,7	
22		0,83	1,56	0,27	82,7		0,82	2,51	0,23	90,8		0,81	2,98	0,23	92,3		0,81	1,65	0,23	86,1		0,82	2,17	0,28	87,1	
23	400	0,80	3,73	0,28	92,5		0,81	6,93	0,24	96,5		0,80	3,55	0,21	94,1		0,80	2,77	0,20	92,8		0,80	2,15	0,22	89,8	
24		0,80	3,69	0,29	92,1		0,79	2,23	0,22	90,1		0,79	1,63	0,21	87,1		0,79	1,63	0,27	83,4		0,79	1,76	0,22	87,5	
25	600	1,07	3,09	0,24	92,2		1,05	2,85	0,24	91,6		1,04	2,14	0,26	87,9		1,03	1,62	0,24	85,2		1,03	1,95	0,24	87,7	

6.6 SPRACOVANIE NAMERANÝCH HODNÔT

V tejto kapitole budú zhrnuté hodnoty zákalu a transmembránového tlaku, ktoré boli namerané počas sledovaných 25 filtračných cyklov ultrafiltračného membránového modulu Microdyn Nadir na Čerpacej stanici Horedolinie. Do priemerných hodnôt boli započítané všetky merania, ale je dôležité zobrať do úvahy, že meranie pre 25-ty cyklus pri prietoku 600 l/h bolo len doplnkové a počet nameraných hodnôt sa nezhoduje s ostatnými sledovanými prietokmi. Zákal surovej vody počas merania kolísal a pohyboval sa v rozsahu 1,28-6,93 FNU. Väčšina odobratých vzoriek surovej vody spĺňala limitnú hodnotu zákalu 5 FNU. Táto hodnota bola prekročená len pri dvoch odberoch. Hodnoty zákalu vody po jej prečistení ultrafiltračnou membránou boli v rozmedzí 0,19-3,16 FNU.

Transmembránový tlak sa podľa očakávaní zvyšoval pri zväčšovaní prietoku a jeho priemerné hodnoty pre konkrétne nastavené prietoky sú uvedené v Tab. 6.2. V rámci jednotlivých cyklov boli jeho hodnoty ustálené a nedochádzalo k jeho poklesu.

Tab. 6.2 Priemerné hodnoty transmembránového tlaku pri rôznych hodnotách prietoku

priemerný TMP (Q 100 l/h)=	0,4	bar
priemerný TMP (Q 200 l/h)=	0,6	bar
priemerný TMP (Q 300 l/h)=	0,7	bar
priemerný TMP (Q 400 l/h)=	0,8	bar
priemerný TMP (Q 600 l/h)=	1,0	bar

Priemerná účinnosť odstránenia zákalu membránovým modulom počas celého merania bola 80,8%. Jej priemerné hodnoty pre odpovedajúce prietoky sú zobrazené v Tab. 6.3.

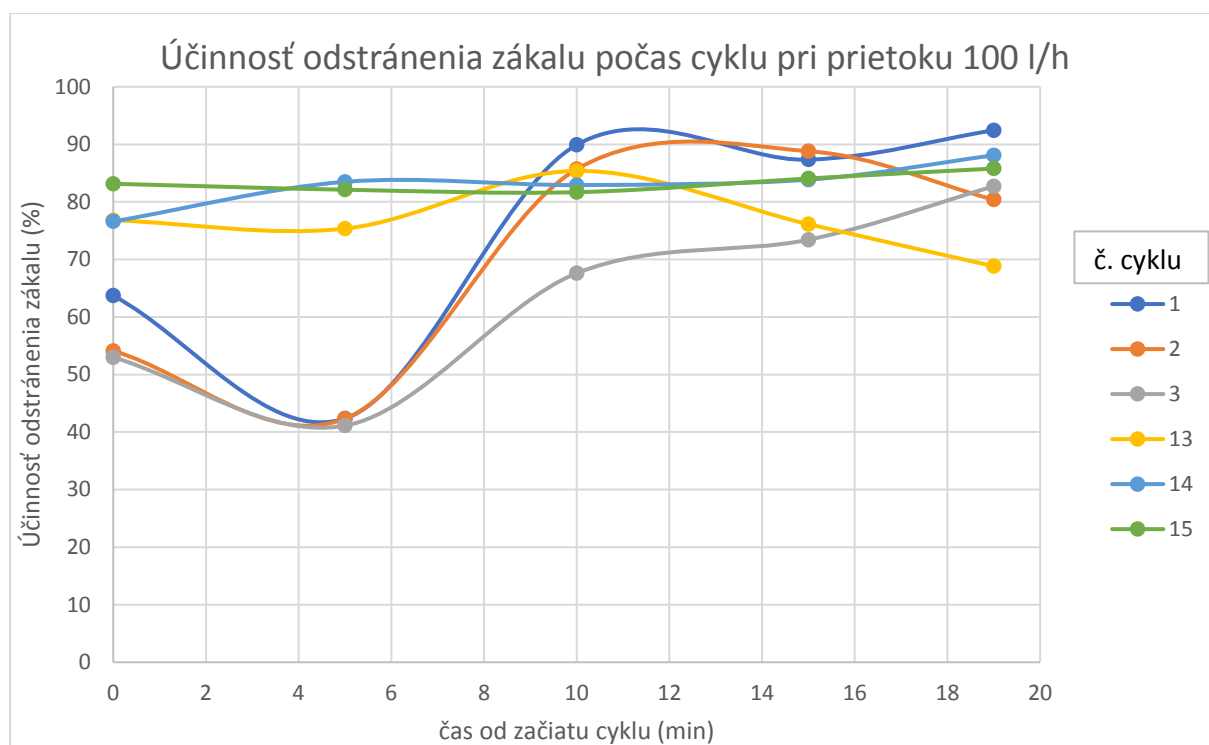
Tab. 6.3 Priemerné hodnoty účinnosti odstránenia zákalu pri rôznych hodnotách prietoku

priemerná účinnosť (Q 100 l/h)=	75,3	%
priemerná účinnosť (Q 200 l/h)=	78,8	%
priemerná účinnosť (Q 300 l/h)=	82,2	%
priemerná účinnosť (Q 400 l/h)=	85,4	%
priemerná účinnosť (Q 600 l/h)=	88,9	%

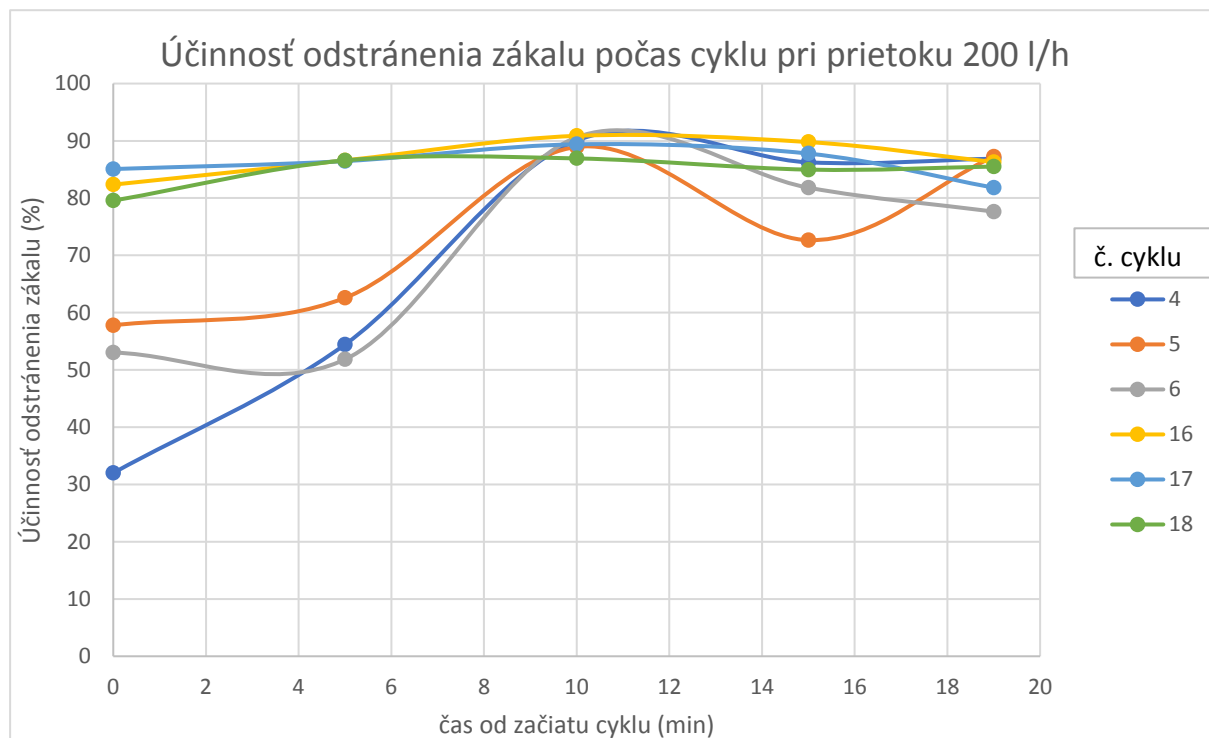
Z uvedených hodnôt je zrejmé, že so zvyšujúcim sa prietokom, sa zvyšuje aj účinnosť membrány pri odstraňovaní zákalu. Tento zdanlivý jav však môže byť zavádzajúci z nasledujúceho dôvodu.

Pri podrobnejšej analýze nameraných hodnôt, boli zostrojené grafy priebehu účinnosti odstránenia zákalu v čase cyklu, samostatne pre sledované hodnoty prietokov. Tieto grafy sú zobrazené nižšie (Graf 6.4, 6.5, 6.6, 6.7). Z dôvodu nedostatku údajov pre porovnanie, nie je uvedený graf pre doplnkový prietok 600 l/h.

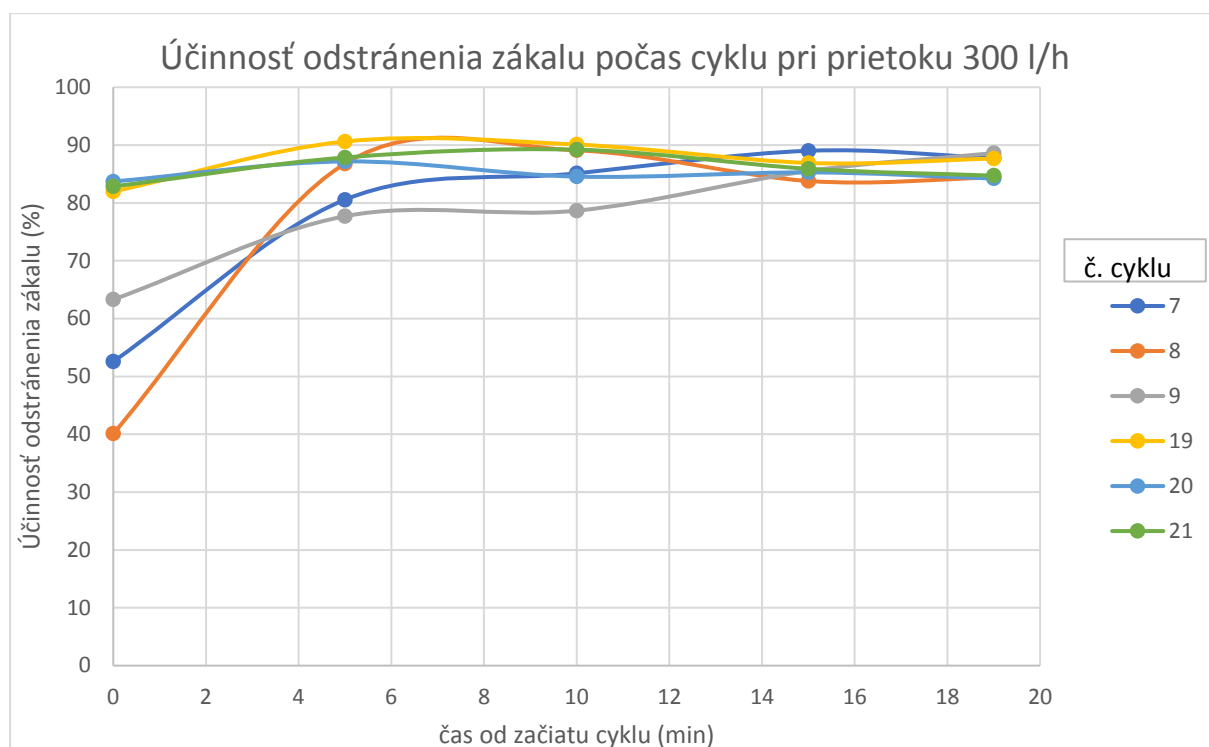
Graf 6.4 Účinnost odstránenia zákalu počas cyklu pri prietoku 100 l/h



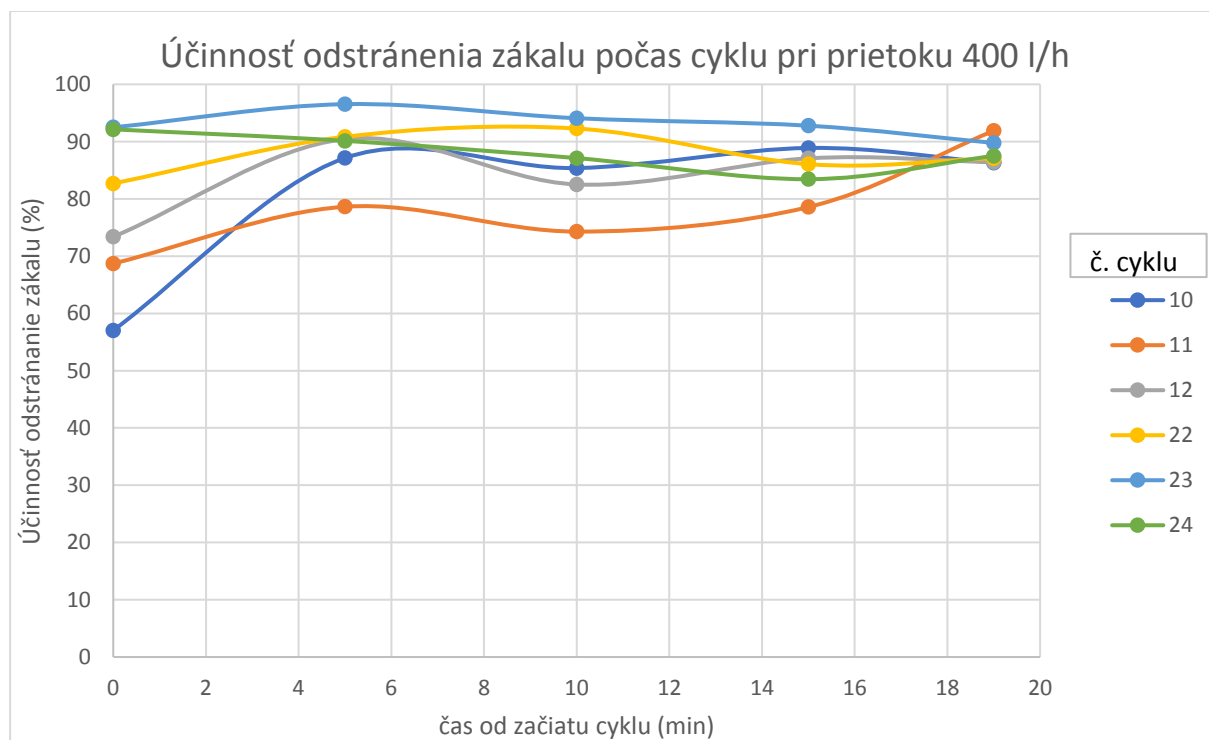
Graf 6.5 Účinnosť odstránenia zákalu počas cyklu pri prietoku 200 l/h



Graf 6.6 Účinnost odstránenia zákalu počas cyklu pri prietoku 300 l/h



Graf 6.7 Účinnosť odstránenia zákalu počas cyklu pri prietoku 400 l/h

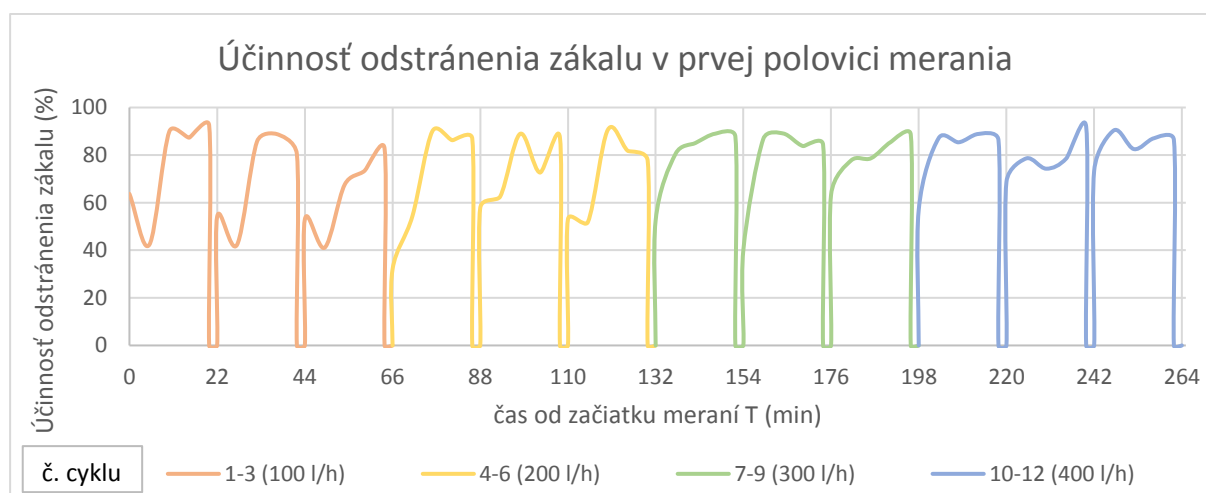


Z Grafov 6.4 a 6.5 je zjavné, že trojice cyklov, ktoré boli sledované v prvej polovici merania sú charakteristické kolísajúcou účinnosťou a jej výraznými poklesmi na začiatku cyklu. Zatiaľ čo trojice cyklov sledované v druhej polovici merania majú účinnosť relatívne ustálenú na vyšších hodnotách.

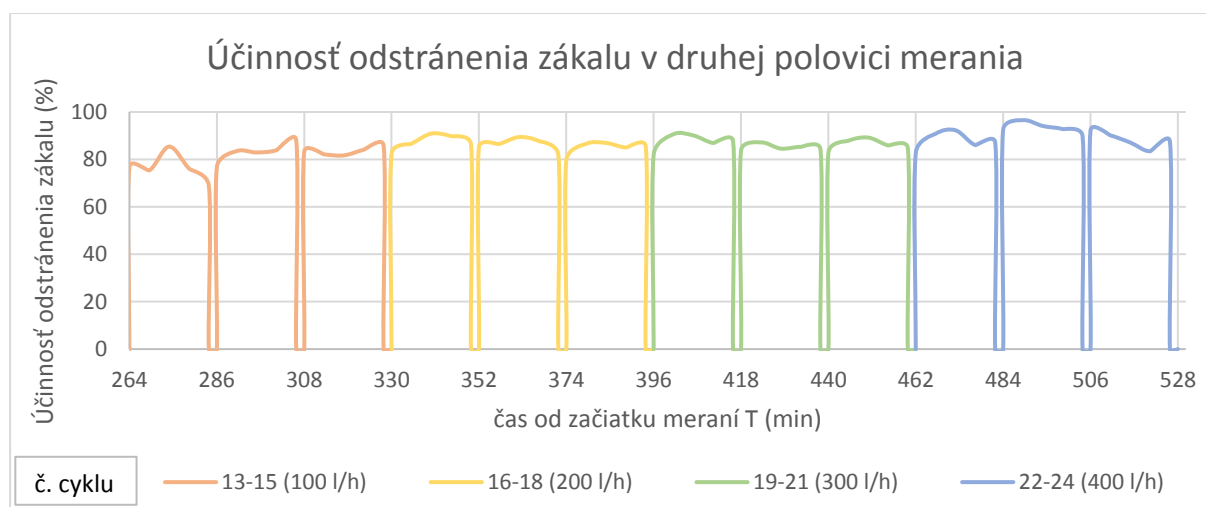
Na Grafe 6.6, ktorý znázorňuje cykly merané neskôr v čase, je tento jav tiež pozorovateľný ale je menej výrazný. Cykly zobrazené na Grafe 6.7, ktoré predstavujú najväčšie prietoky a zároveň prebiehali ako posledné, sú hodnoty účinnosti na začiatku a na konci cyklu najmenej rozkolísané a je takmer nerozoznateľné, ktoré cykly boli realizované v prvej polovici merania.

Pre lepšie pozorovanie priebehu účinnosti odstránenia zákalu v čase boli zostavené Grafy 6.8 a 6.9, v ktorých sú chronologicky usporiadané všetky cykly, od začiatku merania ($T = 0$). Nulové hodnoty účinnosti v týchto grafoch predstavujú dobu, počas ktorej prebiehalo mechanické pranie membrány medzi jednotlivými filtračnými cyklami a teda nedochádzalo v tomto čase k filtrácii.

Graf 6.8 Účinnosť odstránenia zákalu v prvej polovici merania



Graf 6.9 Účinnosť odstránenia zákalu v druhej polovici merania



6.7 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT

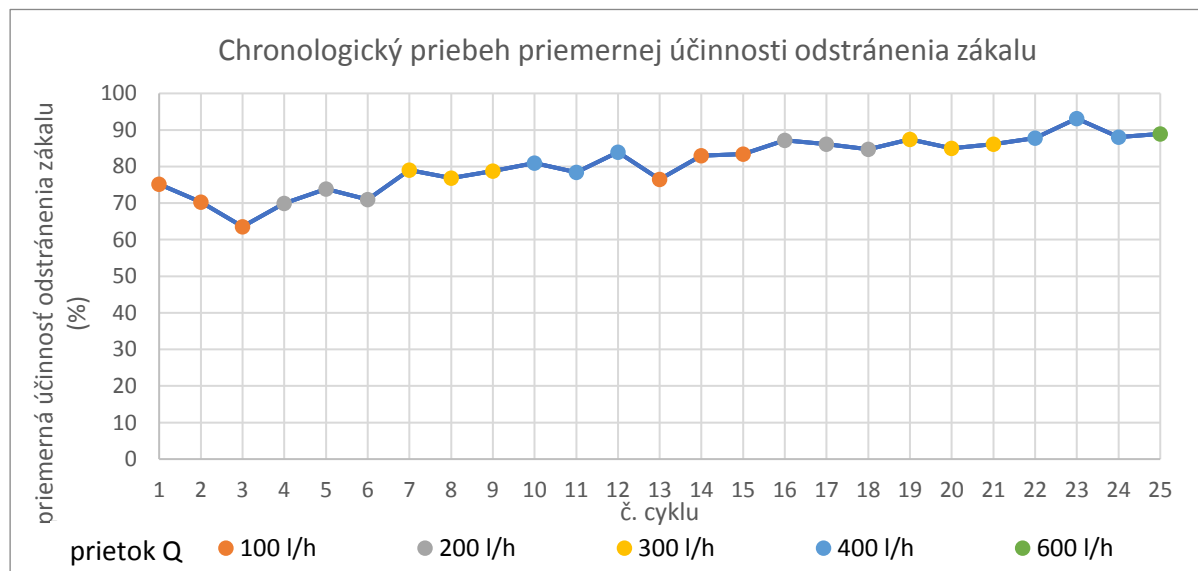
Na vyššie uvedených grafoch je možné pozorovať, že na začiatku merania bola účinnosť odstránenia zákalu ultrafiltračnou membránou nestabilná a v jej priebehu nastával pokles v prvej polovici cyklu. Najnižší meraný prietok (100 l/h) bol sledovaný ako prvý a počas neho dochádzalo aj k najvýraznejším výkyvom a poklesom účinnosti. So zvyšujúcim sa prietokom a zároveň s pribúdajúcim časom od spustenia zariadenia sa odchýlky účinnosti znižovali. Pri opakovaní merania pri rovnakých prietokoch už boli hodnoty účinnosti relatívne stabilizované a väčšinou neklesli pod 80%.

Pre každý samostatný filtračný cyklus bola vypočítaná priemerná účinnosť odstránenia zákalu. Hodnoty sú chronologicky zoradené v nasledujúcej tabuľke (Tab. 6.4) a graficky sú tieto hodnoty spracované v Grafe 6.10.

Tab. 6.4 Priemerná účinnosť odstránenia zákalu pre jednotlivé cykly

č. cyklu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Q [l/h]	100	100	100	200	200	200	300	300	300	400	400	400	
priemerná účinnosť [%]	75	70	64	70	74	71	79	77	79	81	78	84	
č. cyklu	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Q [l/h]	100	100	100	200	200	200	300	300	300	400	400	400	600
priemerná účinnosť [%]	77	83	83	87	86	85	87	85	86	88	93	88	89

Graf 6.10 Chronologický priebeh priemernej účinnosti odstránenia zákalu



V Grafe 6.10 je viditeľné, že priemerná účinnosť odstránenia zákalu jednotlivých cyklov je mierne kolísajúca ale celkovo má stúpajúci charakter so zvyšujúcim sa poradovým číslom cyklu a teda s pribúdajúcim časom. Tento jav spôsobuje, že priemerné hodnoty účinnosti zdanlivo rastú so stúpajúcim prietokom. Prínosné by bolo realizovanie ďalších meraní, s iným poradím použitých prietokov.

7 ZÁVER

Praktická časť tejto bakalárskej práce bola zameraná na problém kvality vody v obci Poniky v Slovenskej republike, kde jeden zo zdrojov pitnej vody (prameň Horedolienie 2) trpí sezónnym zvýšením zákalu po výdatných zrážkach a jarnom topení snehu. Na čerpacej stanici, ktorá vodu z tohto zdroja dopravuje do vodojemu, bola nainštalovaná ultrafiltračná jednotka, v poloprevádzkovom režime. V rámci práce bolo na mieste realizované meranie zákalu a miera jeho odstránenia ultrafiltračným zariadením Microdyn Nadir. Sledovaných bolo 25 filtračných cyklov, trvajúcich 20 minút, s následným mechanickým práním po dobu 2 minút. Meranie prebiehalo pri rôznych hodnotách prietoku.

Na základe nameraných hodnôt a ich graficky spracovaného priebehu sa dá predpokladať, že účinnosť odstránenia zákalu, nie je tak významne závislá od veľkosti nastaveného prietoku. Väčší vplyv má doba trvania kontinuálnej prevádzky modulu. Po započítaní aj 3 nultých cyklov, trvalo približne 13 cyklov kým sa účinnosť odstránenia zákalu ustálila. To pri nastavenej dobe trvania filtračného cyklu odpovedá viac ako 4 hodinám. V prípade Čerpacej stanice Horedolinie ide o dôležitý poznatok, keďže jej prevádzka je príležitostná podľa potreby a bežne je odstavená po dobu niekoľkých týždňov alebo mesiacov.

Je potrebné zvážiť aj nastavenie dĺžky filtračného cyklu. Za podmienok pri akých prebiehalo meranie, by bolo vhodné jeho trvanie predĺžiť. Nedochádzalo k poklesom transmembránového tlaku počas cyklu a teda filtrácia by mohla úspešne pokračovať dlhšie ako zvolených 20 minút, čo by zvýšilo produkciu upravenej vody. Predĺženie cyklu by mohlo mať aj priaznivé účinky na spomínaný pokles účinnosti membrány, ktorý sa vyskytuje na začiatku cyklu. A teda pri jeho predĺžení by nebol tak častý. No je potrebné zobrať do úvahy, že meranie prebiehalo pri priaznivejších podmienkach ako tie, pri ktorých je predpokladaná prevádzka čerpacej stanice.

Nie je možné dospieť k jednoznačným záverom len po vyhodnotení uvedených, doposiaľ realizovaných meraní. Pri uvedených hodnotách zákalu, výkyvy účinnosti jeho odstránenia nepredstavovali hrozbu pre výslednú kvalitu vody, keďže zákal sa takmer celú dobu pohyboval v povolených hodnotách už pred úpravou. Je teda dôležité do budúcnosti realizovať ďalšie merania a to najmä po výdatných dažďoch, keď je zákal na zdroji najvyšší. Pokračovanie v meraniach je podstatné nie len pre overenie účinnosti modulu pri vysokých hodnotách zákalu, ale aj pre možnosť sledovania zanášania membrány. Na základe toho bude možné určiť vhodný režim prania, zvoliť čistiace činidlo a jeho dávkovanie.

Hlavným cieľom praktickej časti tejto bakalárskej práce bolo vyhodnotiť ultrafiltračnú jednotku ako riešenie zákalu na vodnom zdroji Horedolinie 2 a jej inštaláciu na Čerpacej stanici Horedolinie. Komplikáciou pre naplnenie tohto cieľa boli dlhodobé nevyhovujúce podmienky na testovanie zariadenia pri zvýšených hodnotách zákalu. Neboli však pozorované žiadne okolnosti, ktoré by ohrozovali funkčnosť ultrafiltračnej jednotky na Čerpacej stanici Horedolinie a je možné predpokladať, že zariadenie je aplikovateľné pre riešenie daného problému.

8 POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] WANG, Lawrence K., Jiaping Paul CHEN, Yung-Tse HUNG a Nazih K. SHAMMAS, ed. *Membrane and Desalination Technologies: A Handbook of Environmental Engineering*. Totowa, NJ, USA: Humana Press, 2011. ISBN 978-1-58829-940-6.
- [2] TUHOVČÁK, Ladislav, Pavel ADLER, Tomáš KUČERA a Jaroslav RACLAVSKÝ. *Vodárenství: A. Úprava vody*. Brno, 2006. Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně (VUT).
- [3] LETTERMAN, Raymond D., ed. *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*. 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1999. ISBN 0-07-001659-3.
- [4] MULDER, Marcel. *Basic Principles of Membrane Technology*. 2nd. ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996. ISBN 978-94-009-1766-8.
- [5] Inorganic Membranes: Preparation and Application for Water Treatment and Desalination. *Materials*. 2018, (11), 3-47.
- [6] Flat Sheet Membrane Modules for MBR. In: *CNKHONG* [online]. YuHang, Hangzhou, China: Hangzhou Kaihong Membrane Technology CO.Ltd, 2020 [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: http://www.cnkhongmem.com/MBR_flat_sheet_membrane/37.html
- [7] HASANI, S.M.F., A.S. SOWAYAN a M. SHAKAIB. The Effect of Spacer Orientations on Temperature Polarization in a Direct Contact Membrane Distillation Process Using 3-d CFD Modeling. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019, (44). Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1007/s13369-019-04089-x](https://doi.org/10.1007/s13369-019-04089-x)
- [8] Hollow Fiber Membranes. In: *Synder Filtration* [online]. Vacaville, CA, USA [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://synderfiltration.com/learning-center/articles/module-configurations-process/hollow-fiber-membranes/>
- [9] JUDD, Simon. *Membranes for Industrial Wastewater Recovery and Re-use*. Elsevier Science, 2003. ISBN 9781856173896.
- [10] BASILE, Angelo a Suzana Periera NUNES. *Technology for Sustainable Energy and Environmental Applications*. Woodhead Publishing, 2011. ISBN 978-1-84569-969-7.
- [11] Tlakové membránové procesy. *CZEMP* [online]. [cit. 2021-01-29]. Dostupné z: <http://www.czemp.cz/cs/membranove-procesy/tlakove-membranove-procesy>
- [12] SMOLDERS, C.A. a A.C.M. FRANKEN. Terminology for Membrane Distillation. *Desalination*. 1989, **72**(3), 249-262.
- [13] NOYES, Robert. *Unit Operations in Environmental Engineering*. Noyes, Park Ridge, NJ, USA: © William Andrew, 1994. ISBN 9780815513438.
- [14] MADAENI, S.S., A.G. FANE a G.S. GROHMANN. Virus removal from water and wastewater using membranes. *Journal of Membrane Science*. 1995, **102**, 65-75. ISSN 0376-7388. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/0376-7388\(94\)00252-T](https://doi.org/10.1016/0376-7388(94)00252-T)

- [15] ŠKORVAN, Ondřej. Tlakové membránové procesy ve vodním hospodářství. In: *Asio.cz* [online]. 2013 [cit. 2021-01-30]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/264.tlakove-membranove-procesy-ve-vodnim-hospodarstvi>
- [16] STRATHMANN, H. Membrane separation processes. *Journal of Membrane Science*. 1981, (9), 121-189.
- [17] EPA *Membrane Filtration Guidance Manual*. Washington, DC: US EPA, US Environmental Protection Agency, 2005. EPA 815-R-06-009.
- [18] LUIS, Patricia. *Fundamental Modelling of Membrane Systems: Membrane and Process Performance*. Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-813483-2.
- [19] CARTWRIGHT, Peter S. Guide to Selecting Membrane Separation Technologies. *Water Technology* [online]. 2003 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <https://www.watertechonline.com/home/article/14170727/guide-to-selecting-membrane-separation-technologies>
- [20] *Pilot Testing for Membrane Plants* [online]. Dixie Highway Stuart, Florida: American Membrane Technology Association (AMTA), 2011 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: https://www.amtaorg.com/wp-content/uploads/17_Pilot_Testing_for_Membrane_Plants.pdf
- [21] Membrane cleaning methods. *Lenntech* [online]. Delfgauw: Lenntech B.V., 2014 [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://www.lenntech.com/membrane-cleaning.htm#Chemical%20cleaning>
- [22] *Membrane Chemical Cleaning: Why Is It Required And How Is It Performed?* [online]. Kent, Washington: SterliTech, 2007 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://www.wateronline.com/doc/membrane-cleaning-part-3-selecting-membrane-c-0001>
- [23] LUECK, Stan. Membrane cleaning, part 3: Selecting membrane cleaning methods and materials. *Water Online* [online]. Aztec, Nové Mexiko: Water Online, 2000 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://www.wateronline.com/doc/membrane-cleaning-part-3-selecting-membrane-c-0001>
- [24] EL-DESSOUKY, Hisham T. a Hisham M. ETTOUNEY. *Fundamentals of Salt Water Desalination*. Kuwait University: Elsevier Science, 2002. ISBN 978-0-444-50810-2.
- [25] ARMSTRONG, M. W., S. GALLEGU a S. P. CHESTERS. Biofilm removal - a practical approach. *Genesys International: Reverse osmosis (RO) membrane cleaning chemicals* [online]. Middlewich, Cheshire, UK: Genesys [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://www.genesysro.com/ro-membrane-cleaning-chemicals-free-research-docs.php>
- [26] OSTARCEVIC, Eddy R., Joseph JACANGELO, Stephen R. GRAY a Marlene J. CRAN. Current and Emerging Techniques for High-Pressure Membrane Integrity Testing. *Membranes*. 2018, **60**(8), 2-27. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/membranes8030060](https://doi.org/10.3390/membranes8030060)
- [27] PEIRIS, R.H., H. BUDMAN, C. MORESOLI a R.L. LEGGE. *Optimization & Control in Wastewater Treatment: Optimization of a Membrane Filtration Process for Drinking Water Production using On-line Fluorescence and Permeate Flux measurements*. Miláno: The International Federation of Automatic Control, 2011.

- [28] MOVAHED, Ben. Examining Goals of a Membrane Pilot Study. *Water & Wastes Digest* [online]. Scranton, Pennsylvania: Water & Wastes Digest, 2010 [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.wwdmag.com/examining-goals-membrane-pilot-study>
- [29] SPRATKOVÁ, Aneta. *VYUŽITÍ MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ PŘI ÚPRAVĚ VODY*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně (VUT).
- [30] MUSIL. Membránová filtrace pro úpravu pitné vody. *Asio.cz* [online]. Asio®, ©2021 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/52.membranova-filtrace-pro-upravu-pitne-vody>
- [31] KOŽÍŠEK, F. *Co se událo v americkém Flintu a české Trnové a jaké to má paralely: Sborník konference Pitná voda 2016, s. 153 - 158.*, Č.Budějovice: W&ET Team, 2016. ISBN 978-80-905238-2-1.
- [32] PAUL, Jiří. Trnová má spolehlivé zásobování vodou. *Energie AG Bohemia* [online]. Beroun, 2019 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://www.energieag.cz/Aktuality/Trnov%C3%A1-m%C3%A1-spolehliv%C3%A9-z%C3%A1sobov%C3%A1n%C3%AD-vodou.html#>
- [33] HRUŠKOVÁ, Petra, Jiří PAUL, Petr DOLEJŠ, Pavel DOBIÁŠ a Tomáš BRABENEC. Mikrofiltrace na ÚV Trnová - první zkušenosti v reálném provozu. *Sovak*. 2017, **26**(7-8.17), 9-12/217.
- [34] Membránová úprava vody: AMAYA Kermanický membránový element. *Envi-pur* [online]. Praha, c 2021 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://www.envi-pur.cz/upravny-pitne-vody-membranova-uprava-vody/>
- [35] DRECHSLER, Josef. *Využití integrovaných technologií pro úpravu povrchových a použitých vod*. Praha, 2016. Dizertační práce. VŠCHT Praha.
- [36] PROCHÁZKA, Jindřich, Tomáš BRABENEC, Petra HRUŠKOVÁ a Tomáš MUNZAR. Zkušenosti s provozem mobilní membránové úpravy ve Vyšším Brodě. *Sovak*. 2019, **28**(5), 32-36/165.
- [37] Ultrafiltrace na ÚV Svobodka. *Vodohospodářské sdružení obcí západních Čech* [online]. VSOZČ, 2020 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <http://www.vsozc.cz/cs/investice/nejvyznamnejsi-investice/123-investice/nejvyznamejsi-investice/756-ultrafiltrace-svobodka.html>
- [38] Microfiltration and ultrafiltration membranes for drinking water. *American Water Works Association Journal*. Denver, 2008, **100**(12), s. 85/257.
- [39] *Oficiálna stránka obce Poniky* [online]. [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: <https://www.poniky.sk/>
- [40] MEDVEDECKÝ, Mojžiš a Anna DZIACKA. *Poniky-Vodovod Prevádzkový poriadok*. Banská Bystrica, 2020.

- [41] AQUADYN® UA640 Hollow Fiber UF Modules. *Microdyn nadir* [online]. 2020 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://www.microdyn-nadir.com/wp-content/uploads/MICRODYN-AQUADYN-UA640.pdf>
- [42] AQUADYN® Hollow Fiber Ultrafiltration Membrane Modules. *Microdyn-Nadir* [online]. 2020 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://www.microdyn-nadir.com/microdyn-aquadyn-uf/>
- [43] Hollow Fiber Modules: This is how AQUADYN® works. In: *Youtube* [online]. 2016: MICRODYN-NADIR [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=K24eK7IdVRg>
- [44] KAMENÍČKOVÁ, Ivana. *Vodní hospodářství krajiny I: Část I - Pedologie*. Brno, 2005. Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně (VUT).
- [45] *Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej Republiky, ktorou sa ustanovujú podrobnosti o kvalite pitnej vody, kontrole kvality pitnej vody, programe monitorovania a manažmente rizík pri zásobovaní pitnou vodou*. In: . Bratislava: Ministerstvo zdravotníctva Slovenskej republiky, 2017, ročník 2017, číslo 257.
- [46] 2100Q Portable Turbidimeter. *Hach* [online]. Loveland, Kolorádo: Hach, c 2020 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <https://www.hach.com/2100q-portable-turbidimeter/product-details?id=7640450963>
- [47] What is the difference between the turbidity units NTU, FNU, FTU, and FAU? What is a JTU? *Hach* [online]. Loveland, Kolorádo: Hach, 2020 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: https://support.hach.com/app/answers/answer_view/a_id/1000336/~/-what-is-the-difference-between-the-turbidity-units-ntu%2C-fnu%2C-ftu%2C-and-fau%3F-what

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2.1. Porovnanie organických a anorganických membrán [5].....	6
Tab. 2.2 Aplikovaný rozdiel tlaku pre jednotlivé membránové procesy [11].....	12
Tab. 6.1 Namerané hodnoty zákalu surovej vody a filtrátu	43
Tab. 6.2 Priemerné hodnoty transmembránového tlaku pri rôznych hodnotách prietoku	44
Tab. 6.3 Priemerné hodnoty účinnosti odstránenia zákalu pri rôznych hodnotách prietoku ...	44
Tab. 6.4 Priemerná účinnosť odstránenia zákalu pre jednotlivé cykly	48

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2.1 Delenie membrán	5
Obr. 2.2 Doskový membránový modul [6]	7
Obr. 2.3 Špirálový membránový modul [7]	7
Obr. 2.4 Trubkový membránový modul [8]	8
Obr. 2.5 Smer prúdenia v moduloch s dutými vláknami a.) Inside-Out flow, b.) Outside-In flow [3]	8
Obr. 2.6 Kapilárny modul [34]	8
Obr. 2.7 a.) "Dead-end" filtrácia, b.) "Cross-flow" filtrácia [1]	9
Obr. 2.8 Usporiadanie elektrodialyzačného zväzku [11]	10
Obr. 2.9 Vzťah medzi veľkosťou pórov membrán a separovanými látkami [1]	11
Obr. 2.10 Pranie membrány, .a)"Forward flush", .b)"Backward flush", .c)"Air flush" [21] ...	17
Obr. 4.1 Mikrofiltračné zariadenie AMAYA a.) jednotka b.) keramický element [34]	26
Obr. 4.2 a.) Rez ultrafiltračným modulom, b.) Plastové vlákna s kapilármi [37]	28
Obr. 5.1 Schéma vodovodu Poniky a Ponická Lehôtka	29
Obr. 5.2 Čerpacia stanica Horedolinie - exteriér	31
Obr. 5.3 Čerpacia stanica Horedolinie - interiér	31
Obr. 5.4 Schéma areálu ČS Horedolinie, PZ – pramenná záchytka	32
Obr. 6.1 Zákalomer ULTRATURB	33
Obr. 6.2 Ultrafiltračný modul UA-640 Microdyn Nadyr	36
Obr. 6.3 Rozmery ultrafiltračného zariadenia UA-640 [3]	36
Obr. 6.4 Filter pre zachytenie hrubých nečistôt	36
Obr. 6.5 Usádzanie pevných látok na povrchu membrány [3]	36
Obr. 6.6 Riadiaci panel ultrafiltračného zariadenia	37
Obr. 6.7 Rotameter	37
Obr. 6.8 Analogové meranie tlaku na zariadení	38
Obr. 6.9 Digitálne meranie tlaku na zariadení	38
Obr. 6.10 Ultrafiltračné zariadenie a nádrž na filtrát v interiéri ČS	39
Obr. 6.11 Odber vzorky surovej vody	40
Obr. 6.12 Odber vzorky filtrátu	40
Obr. 6.13 Schéma zapojenia membránového zariadenia v ČS Horedolinie	40
Obr. 6.14 Zákalomer Hach 2100Q	41
Obr. 6.15 Ampulky na vzorky 15 ml	41

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

CM	katexová membrána
AM	anexová membrána
MF	mikrofiltrácia
UF	ultrafiltrácia
NF	nanofiltrácia
RO	reverzná osmóza
MWCO	molecular weight cut off
CHSK	chemická spotreba kyslíku
GS	separácia plynov
PV	pervaporácia
J	flux
ΔP	tlakový rozdiel
TMP	transmembránový tlak
Q_{total}	Celkový prietok filtrátu
A	plocha membrány
μ	viskozita filtrovanej kvapaliny
R_m	hydraulický odpor membrány
τ	súčiniteľ nerovnosti
Δz	dĺžka pórov (hrúbka membrány)
r	polomer pórov
P_{pore}	počet pórov na jednotku plochy membrány
EDTA	kyselina etyléndiamíntetraoctová
PAC	práškové aktívne uhlie
PAX 18	polyaluminiumchlorid
PAX 19	polyaluminiumchlorid - vodný roztok
ÚV	úpravňa vody
VDJ	vodojem
VZ	vodný zdroj
ČS	čerpacia stanica

PZ	pramenná záchytka
AŠ	armatúrna šachta
PK	prerušovacia komora
ZK	zberná komora
Q _{max}	maximálny prietok
H _{max}	maximálna dopravná výška
P	výkon čerpadla
DN	menovitá svetlosť potrubia
PAN	polyakrylonitril
PVC	polyvinylchlorid
t	čas od spustenia filtračného cyklu
T	čas od počiatku merania
Q	prietok

SUMMARY

The practical part of this bachelor thesis was focused on a water quality problem in the village Poniky in Slovak republic, where one of the drinking water sources (Horedolienie 2 spring) suffers from seasonal increase in water turbidity after heavy rainfalls and snow melting in the spring. There was installed a ultrafiltration unit for testing in the pumping station, which transports the water from the spring to the reservoir. Within this thesis is described an experimental testing performed on this device. In this test was measured turbidity on the water source and it's removal by the ultrafiltration technology. 25 filtration cycles with different flow values were observed, each one lasting 20 minutes, followed by 2 minute mechanical regeneration. The testing started at the lowest possible flow (100 l/h) and was then gradually increased to 200 l/h, 300 l/h, 400 l/h. The same process was then repeated.

Based on the recorded values it seemed that the turbidity removal is more efficient, when heigher flow is being used. After deeper analysis, this effect seems to be caused not by the flow rate but more likely by the time of continuous operation of the device. It took approximately 4 hours for the removal ratio to stabilize. In this case this is an important information, because the pumping station does not operate continuously and is only used when needed. It is normally shut down for long periods of time - weeks and even months.

From the testing it seems appropriate to extend the filtration cycle time. The transmembrane pressure was not decreasing, which means it could perform the filtration for a longer time, resulting in higher water production and it could also help with the removal ratio drop observed in the first few cycles. But it is important to consider that the testing was performed in much less adverse conditions than it is expected for the operation in the future.

It is not possible to come to the conclusion based only from the results of this one testing. Turbidity values were much lower than needed for detailed research. It is important to continue the observation in harsher conditions to establish the optimal duration of the filtration cycle and regeneration, as well as the regeneration chemicals type and their dose. But there were observed no serious negative factors that would endanger the function of the membrane unit in this situation. Therefore it seems as the right solution.